



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH VÝROBY POUZDRA TLAKOVÉHO FILTRU**

PRODUCTION OF PRESSURE FILTER CASING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jiří Janoušek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jiří Janoušek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh výroby pouzdra tlakového filtru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh technologie výroby pouzdra tlakového filtru, ve kterém se přes papírovou kartuš čistí olej v hydraulickém systému. Součástka je válcového tvaru a bude vyráběna technologií protlačování. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární studie.

### Cíle diplomové práce:

- zhodnotit technologičnost pouzdra,
- provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- vypracovat aktuální literární studii se zaměřením na zvolenou technologii,
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- navrhnout a popsat tvářecí nástroj,
- zhotovit výkres nástroje a kusovník.

### Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Nakladatelství VUT v Brně. Brno: Rekrorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. ISBN 80-214-0294-6.

SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010-2011, 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4406-52.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962, 197 s.

MARCINIAK, Zdislaw, John L. DUNCAN a Jack S. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

JANOUSEK Jiří: Návrh výroby pouzdra tlakového filtru.

---

Práce předkládá návrh technologie výroby pouzdra tlakového filtru využívaného v hydraulických systémech, který je zhotoven z nelegované uhlíkové oceli 12 020. Součástí se bude vyrábět protlačování za studena a pomocí technologických výpočtů byl navržen postup výroby na dvě operace. Před každou operací se provede povrchová úprava fosfátováním a mýdlováním a musí proběhnout mezioperační žíhání. Pro obě operace byly navrženy nástrojové sestavy a vybrán lis ze strojového parku firmy s jmenovitou silou 25 000 kN. Nakonec bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, ze kterého vyplývá, že cena výroby jednoho kusu je 187 Kč. Bod zvratu byl stanoven na 3 497 kusů za rok.

Klíčová slova: Tváření, dopředné protlačování, zpětné protlačování, Ocel 12 020, tlakový filtr

## **ABSTRACT**

JANOUSEK Jiří: Production of pressure filter casing.

---

The project presents a proposal for the technology of production of the pressure filter casing used in hydraulic systems, which is made of non-alloy carbon steel 12 020. With the help of a literature study of cold extrusion and calculations, the production of the component was designed, which will take place in two operations. Before each operation, the surface treatment is performed by phosphating and soaping and inter-operational annealing must take place. Tool sets were designed for both operations and a press was selected from the company's machine park with a nominal force of 25,000 kN. Finally, a technical and economic evaluation was proved, which shows that the price of production of one piece is CZK 187. The turning point was set at 3 497 pieces per year.

Keywords: Forming, forward extrusion, backward extrusion, 12 020 steel, pressure filter

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JANOUSEK, Jiří. *Návrh výroby pouzdra tlakového filtru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129530>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Moutnicích dne 21.5.2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Kamilovi Podanému, PhD. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále děkuji firmě Metaldyne Oslavany za poskytnutí zadání a možnost spolupráce. Především pak panu Ing. Radku Dubšíkovi za jeho čas, konzultace a praktické rady. Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům, Erice a Jiřímu Janouškovým, za poskytnuté zázemí a neustálou podporu při studiu.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Variantní řešení.....	12
<b>2 TECHNOLOGIE PROTlačOVÁNÍ .....</b>	<b>14</b>
2.1 Příprava polotovaru.....	15
2.2 Deformace a napětí .....	18
2.2.1 Dopředné protlačování.....	18
2.2.1 Zpětné protlačování.....	22
2.3 Nástroje .....	25
2.3.1 Nástroje pro dopředné protlačování.....	26
2.3.2 Nástroje pro zpětné protlačování.....	28
2.3.3 Armování průtláčnic.....	30
2.4 Stroje .....	31
2.5 Technologičnost .....	32
<b>3 NÁVRH ŘEŠENÍ.....</b>	<b>34</b>
3.1 Varianty výroby .....	34
3.2 Volba polotovaru .....	36
3.3 Technologický postup a výpočty .....	39
3.3.1 První operace.....	40
3.3.2 Druhá operace.....	42
3.3.3 Výsledky simulace.....	46
3.4 Návrh nástroje pro 1. operaci .....	48
3.5 Návrh nástroje pro 2. operaci .....	50
3.6 Volba stroje .....	54
<b>4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ .....</b>	<b>55</b>
<b>5 ZÁVĚRY .....</b>	<b>60</b>

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů



## ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

S rostoucím pokrokem moderní technologie a se zvyšujícími se nároky zákazníků na přesnost a rychlost výroby, se během 20. století začaly značně rozvíjet technologie tváření, které za pomoci strojů schopných vyvolávat vysoké tvářecí síly umožňují hromadnou sériovou výrobu, která je i při vyšších vstupních nákladech schopna ušetřit nemalé výdaje.

Pomocí nástrojů je na polotovary vyvíjen tlak, který ho přetváří na požadovaný tvar výrobku. Technologie tváření mohou probíhat jak za tepla, tak i za studena a dají se rozdělit na dvě kategorie. Plošné tváření vychází většinou z plechu a patří do něj stříhání, tažení, či ohýbání. Druhým typem je objemové tváření, kam patří pýchování, protlačování a kování.

Velmi důležitou roli v této oblasti zastává protlačování za studena, které využívá deformačního zpevnění materiálu. Pomocí přetvoření polotovaru se zvyšují mechanické vlastnosti součástí jako je mez pevnosti nebo tvrdost. K dalším výhodám patří snížení výrobních časů, výdajů a v neposlední řadě značná úspora materiálu, který je v některých případech využit až na 100 %. Při protlačování lze dosáhnout přesnosti IT 6 až IT 9. Konkrétní příklady součástí lze vidět na obrázku 1.



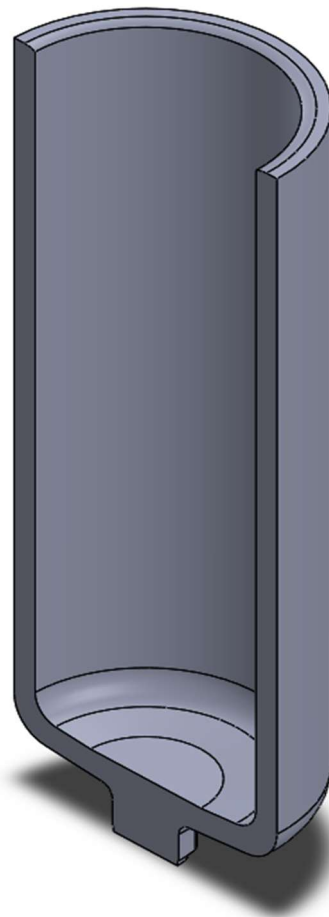
Obr. 1 Vzory součástí vyráběné objemovým tvářením [5]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [4], [5], [7], [8], [9], [35]

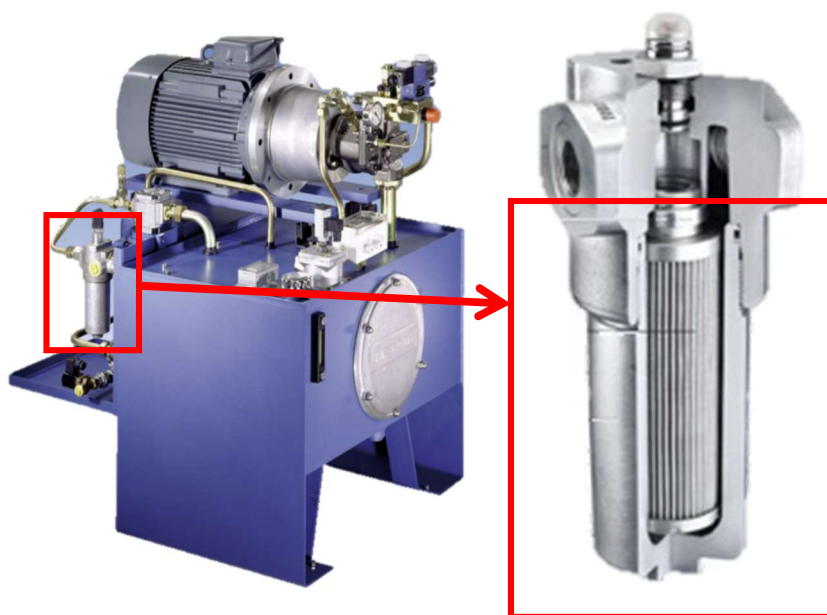
Práce řeší výrobu pouzdra tlakového filtru, který se používá pro hydraulické systémy využívané v mnoha průmyslových odvětvích, viz obr. 2. Lze je najít u tvářecích a obráběcích strojů, v energetice, v lodním průmyslu či u stavební techniky. V nich se pomocí čerpadla rozhání olej, který tlačí na píst a uvádí tak zařízení do pohybu. Aby nedocházelo k častým poruchám, je nutno olej čistit a k tomu slouží právě tlakové filtry. Jednou z jejich hlavní částí je pouzdro, které v sobě uchovává papírovou kartuši a umožňuje její pravidelnou výměnu a při tom odolává vysokým tlakům soustavy. Jeho konkrétní umístění v hydraulickém systému lze vidět na obrázku 4.

Výroba součásti je řešena ve spolupráci s firmou Metaldyne Oslavany, spol. s r.o., která patří pod nadnárodní společnost American Axle & Manufacturing (obr. 3) a sídlí v Oslavanech. Výroba je zde zaměřena na součástky do automobilů, či nákladních aut pro známé světové značky. Konkrétními příklady mohou být držákové náboje, součástky převodovek, nebo právě pouzdra tlakových filtrů. Jedná se tedy o typ součásti, se kterým se ve firmě často setkávají, lze tak využít praktické zkušenosti z dřívější výroby.

Zadané pouzdro se vyrábí jako polotovar pro zákazníka, který na něm provádí další úpravy. Veškeré jeho požadavky na rozměry, toleranci, materiál či dodání byly zadány pomocí zákaznického výkresu. Jak lze vidět na obrázku 5 jedná se o součást válcového tvaru, který je z jedné strany otevřený. Druhou stranu tvoří šestihran o velikosti SW 30, který slouží k montáži pouzdra do sestavy. Hlavní rozměry součásti jsou 270 mm na délku a 119 mm v průměru s tloušťkou stěny 9,5 mm.



Obr. 2 Řešená součást [vl. tvorba]



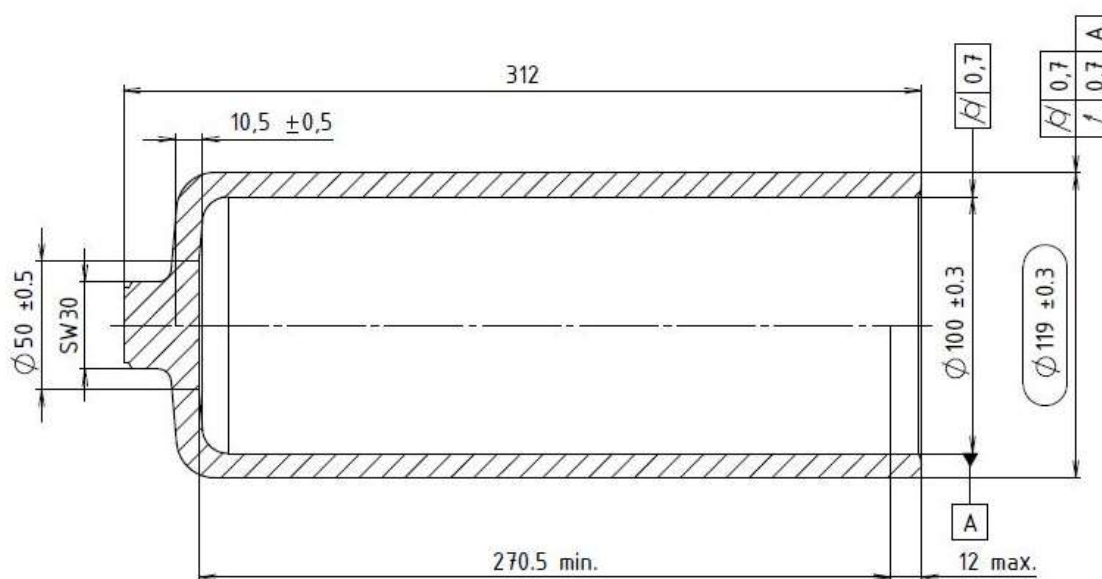
Obr. 4 Umístění pouzdra tlakového filtru [7], [8]



Obr. 3 Logo firmy [4]

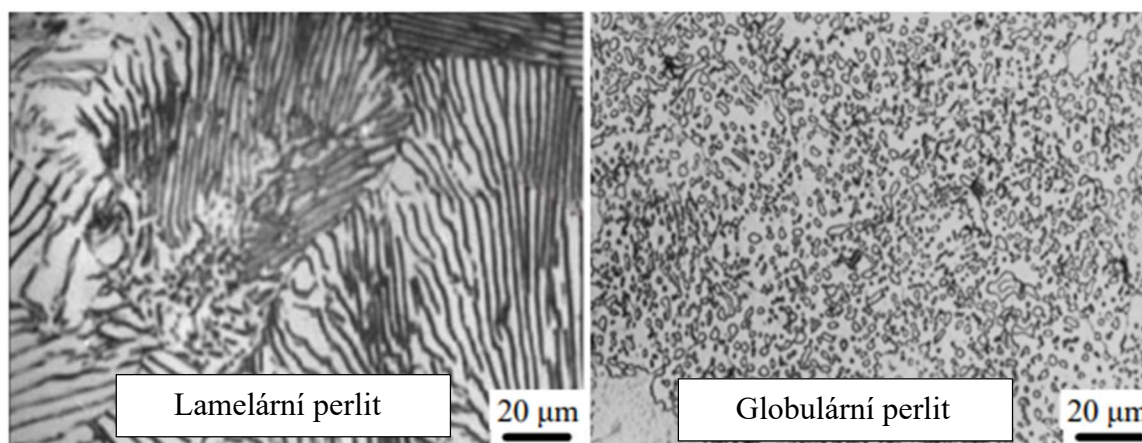
V hydraulické soustavě budou na pouzdro působit pracovní tlaky okolo 100 barů, a proto je nutné dodržet zákazníkem stanovené podmínky:

- Tvrdost součásti musí být minimálně 145 HB, a to v celém jejím objemu.
- Mez kluzu je stanovena na minimálně 450 MPa a mez pevnosti na minimálně 538 MPa.
- Dodržet rozměrové tolerance, které dosahují přesnosti až IT 9, viz obr. 5.
- Splnit zadanou válcovitost vnějšího a vnitřního průměru, a také házení válcových ploch, viz obr. 5.
- Dodat výrobky v odpovídající kvalitě. Pro zajištění čistého povrchu i při skladování a přepravě, musí být opatřeny krátkodobou ochranou proti korozi.
- Vyrábět součást v sérii 8 000 ks/rok.



Obr. 5 Vyráběná součást [vl. tvorba]

Aby byly podmínky splněny, je nezbytná správná volba materiálu, který musí být cenově dostupný, splňovat mechanické vlastnosti a mít dobrou tvárnost. Nejčastěji se používají nízkouhlíkové oceli, které mají obsah uhlíku pod 0,2 %. Jejich struktura se skládá z feritu a perlitu a je vhodné, aby se perlit vyskytoval v globulární (kuličkové) formě, viz obr. 6. Pokud je perlit v lamelární formě, je nutné materiál vyžehat, čímž se dosáhne požadované struktury. Důležitou roli také hraje velikost zrna. Jestliže velikost zrna klesá, roste deformační odpor, a tak by se jeho plocha měla pohybovat v intervalu 400 – 4 000  $\mu\text{m}^2$ .



Obr. 6 Struktura materiálu [9]

Z těchto důvodů byla zvolena, jako vhodný materiál pro výrobu pouzdra, ocel C15. Jedná se o nelegovanou ušlechtilou uhlíkovou ocel značenou 1.1141 (12 020), která je určena pro méně namáhané strojní díly menších a středních rozměrů jako jsou vačkové hřídele, pouzdra, čepy a ozubená kola. Často se využívá při tváření za studena, je běžně svařitelná a vhodná pro cementování. Naopak není určena ke galvanickému pokovování. Její chemické složení je vyznačeno v tabulce 1 a její mechanické vlastnosti v tabulce 2. Celý materiálový list je v příloze 1.

Tabulka 1 Chemické složení oceli C15

Prvek		C	Si max.	Mn	P max.	S max.
hmotnostní %	Max	0,18	0,40	0,60	0,035	0,35
	Min	0,12	-	0,30	-	-

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti oceli C15

Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost	Nárazová práce	Tvrдость
450 MPa	500 MPa	10 %	30 Jcm <sup>-2</sup>	114-154 HB

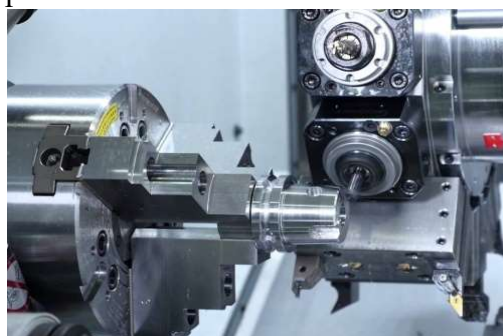
### 1.1 Varianty řešení [1], [2], [3], [6], [10], [11], [12], [13]

Pro výrobu součásti lze použít různé způsoby výroby. Při volbě je nutné dbát na určité požadavky, jako je velikost výrobní série, technologičnost, požadavky na tvarovou a rozměrovou přesnost, použitý materiál a jeho výchozí mechanické vlastnosti. Lze tedy zvážit tyto technologie:

- Odlévání (obr. 7) – spočívá v nalití roztaveného kovu do formy, je vhodné pro výrobu součástí různých tvarů v malých i větších sériích, avšak po ztuhnutí kovu jsou nutné další úpravy součásti, jako je odstranění vtokového kanálku, což se projevuje ztrátou materiálu. Další nevýhodou může být nerovnoměrná struktura materiálu, který nemusí dosahovat zadaným požadavkům, nebo horší přesnost výsledné součásti, kdy při použití klasických pískových forem se dosahuje maximální přesnosti IT10. Další problém by mohl nastat při zatékání kovu, protože se jedná o součást s relativně tenkou stěnou. Také jsou zde delší časy výroby kvůli přípravě modelu součástky, jader a forem, tuhnutí kovu, vyjímání součástky z formy a následným úpravám odlitku. Z těchto důvodů nebyla metoda vybrána.
- Obrábění (obr. 8) – jedná se o technologii, kde se pomocí řezného nástroje odebírá materiál obrobku. Pro výrobu dané součásti je potřeba hned několika druhů obrábění, a to soustružení na vnější tvar, vrtání k výrobě vnitřního otvoru a frézování k výrobě matice. K tomu se může využít moderních CNC strojů, které zvládnou všechny operace. A výsledná součást také dosahuje vysokých přesností okolo IT5. Jelikož se však jedná o skořepinovou součást, vznikalo by značné množství odpadu ve formě třísek, které je nutno skladovat a dále s nimi pracovat. Další nevýhodou jsou delší výrobní časy a také horší



Obr. 7 Odlévání [10]



Obr. 8 Obrábění [11]



mechanické vlastnosti materiálu kvůli porušení průběhu vláken. A proto ani tato metoda nebyla vybrána.

- Zápustkové kování (obr. 9) – je metoda objemového tváření, kde je zahřátý polotovar uložen na spodní část zápustky a tvářen pomocí horní zápustky, která je připevněna na pohyblivé části stroje (buchar nebo lis). Mezi výhody technologie patří snížení deformačních odporů zahřátím materiálu, zjemnění struktury a vytvarování jeho vláken podle tvaru součásti, což zlepšuje mechanické vlastnosti výkovku. Nevýhodou může být ztráta materiálu ve tvorbě okují, či v nezbytných technologických přídavcích jako jsou úkosity na vyjmutí výkovku ze zápustky, kvůli kterým by nešla zajistit válcovitost součásti. Hlavní nevýhodou je však složité hledání dělicí roviny a zejména tvar dlouhé duté nádoby, který je jen velice těžko vyrobitelný.



Obr. 9 Zápustkové kování [12]

- Protlačování (obr. 10) – je technologií objemového tváření, kde je polotovar pomocí síly stroje přetvářen na požadovaný tvar. Díky tomu, že proces může probíhat za studena přináší velkou úsporu materiálu, potřebné energie a značné snížení výrobních časů – tedy zmenšení výrobních nákladů spolu s lepší kvalitou vyrobených součástí se stupněm přesnosti až IT6. Nevýhodou může být složitá tribologie, kde se řeší různá maziva či úpravy povrchů jako je fosfátování a také mezioperační žíhání, které musí následovat po vyčerpání plasticity. Podle toho, jak při procesu teče materiál, se rozeznávají čtyři hlavní metody protlačování – dopředné, zpětné, sdružené a stranové.



Obr. 10 Protlačování [13]

Vzhledem k velké sérii, vyšším nárokům na mechanické vlastnosti součástí, technologičnosti a úspoře materiálu se projevuje jako nejlepší možná technologie pro výrobu pouzdra protlačování. Jelikož je potřeba vytvořit zároveň na jedné straně válcovou nádobu a na straně druhé matici, je nutné využít metody sdruženého protlačování. Práce bude zaměřena na tuto technologii.

## 2 TECHNOLOGIE PROTLAČOVÁNÍ [1], [2], [3], [14], [15], [39]

Protlačování za studena je jednou z technologií objemového tváření, která probíhá pod teplotou rekrytalizace. Dochází při ní k trojosému stavu napjatosti, který je ve tvářeném materiálu vyvolán vnějšími silami nástroje. Jedná se z větší části o napětí tlakové, což umožňuje velké deformace tvářeného materiálu bez porušení, a tak lze pozorovat značné změny tvarů a rozměrů polotovaru.

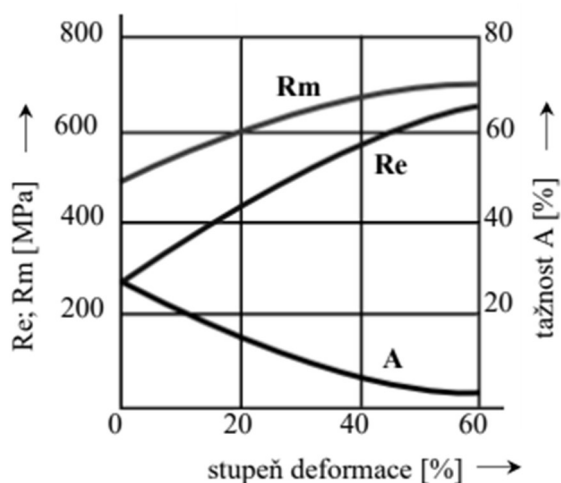
Díky nízké teplotě procesu nedochází k rekrytalizaci struktury materiálu, deformací dochází ke ztrátě plasticity (snížení tažnosti), čímž se zpevňuje. Tím rostou některé jeho mechanické vlastnosti jako je mez kluzu, mez pevnosti, či tvrdost, viz obr. 11. Zlepšení mechanických vlastností výsledné součásti má za následek také neporušení vláken materiálu, ke kterému dochází například u obrábění. Nespornou výhodou dané technologie je úspora materiálu, kdy z počátečního objemu polotovaru je využito na výsledný výrobek 90 až 100 %. Další výhodou je pak vysoká rozměrová a tvarová přesnost protlačků, která dosahuje až stupně tolerance IT6 a kvalitní drsnost povrchu  $R_a$  mezi 0,8 a 1,6  $\mu\text{m}$ .

Nížší teploty tváření mají také negativní následky. Za těchto teplot má materiál větší přetvárný odpor, a tak je nutné použít dražší stroje s větší jmenovitou silou a nástroje z materiálu s lepšími mechanickými vlastnostmi. Kvůli zpevnění klesá houževnatost protlačených součástí a zhoršuje se jejich obrobiteľnost. Při vyčerpání plasticity je nutné zařadit do procesu výroby mezioperační tepelné zpracování, které může trvat i několik hodin.

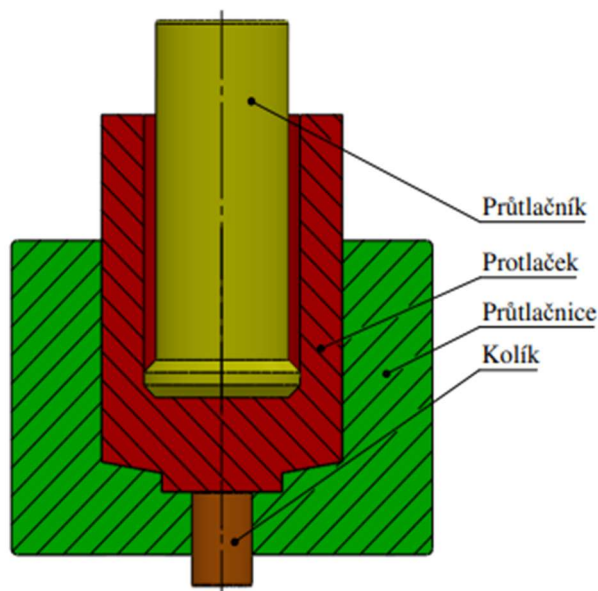
Díky těmto vlastnostem a snadné možnosti automatizace výroby je technologie protlačování vhodná zejména pro větší série, kde je její nasazení velice výhodné.

Pro výrobu zadané součásti je zvoleno sdružené protlačování, které je kombinací dopředného a zpětného protlačování a lze ho vidět na obrázku 12.

Pro možné výpočtové řešení je potřeba si nejprve definovat materiálový a geometrický model, který v procesu nastává. Materiálový model je spojitě homogenní kontinuum s proměnlivými mechanickými vlastnostmi ve směru hlavních přetvoření. Geometrický model se liší podle konkrétního procesu.



Obr. 11 Změna mech. vlastností při tváření za studena [1]



Obr. 12 Sdružené protlačování [2]

## 2.1 Příprava polotovaru [1], [2], [9], [16], [17], [18], [19], [20]

Pro protlačování se většinou dodává materiál ve formě tyčí, které se v závodě následovně zpracovávají. Ty se musí před dělením pečlivě připravit, a to rovnáním pomocí válcové linky, či loupáním, které odstraní z povrchu tyče rez, okuje a další nežádoucí nerovnosti. Poté se tyč dělí na špalíky (výška > průměr), nebo na kaloty (výška < průměr), jejichž výška se počítá pomocí zákona zachování objemu, podle kterého je součet logaritmických přetvoření roven nule:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.1)$$

kde:  $\varphi_{1,2,3}$  – logaritmická deformace [–]

Z toho vychází, že objem polotovaru je roven objemu tvářené součásti:

$$V_{\text{polotovaru}} = V_{\text{protlaček}} \quad (2.2)$$

kde:  $V_{\text{polotovaru}}$  – objem polotovaru [mm<sup>3</sup>]  
 $V_{\text{protlaček}}$  – objem součásti [mm<sup>3</sup>]

Dělení může probíhat pomocí pásových a kotoučových pil (obr. 13), nebo upichováním. K výhodám patří kvalitní kolmá plocha řezu a k nevýhodám se řadí ztráta materiálu ve formě třísek. Dále se k dělení tyčí používá technologie stříhání, kterou se hůře dosahuje kvalitní kolmé plochy, ale nedochází zde k žádným ztrátám materiálu.

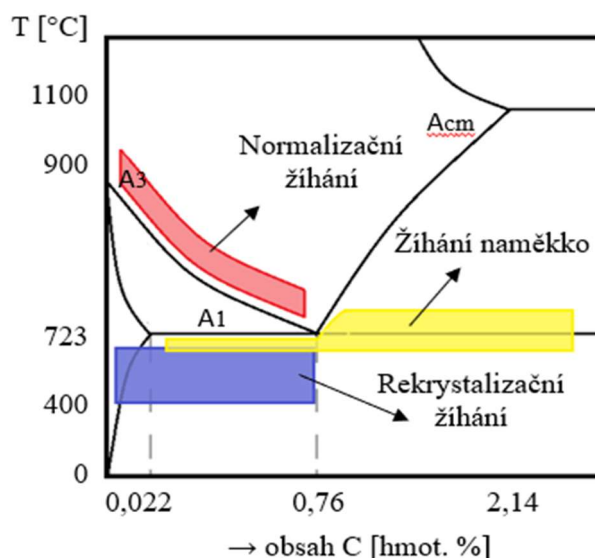
Ve snaze o prodloužení životnosti nástroje a snížení tvářecí síly se na polotovaru provádí další úpravy. Základní úpravou je odstranění povrchových nečistot jako jsou otřepy, okuje, koroze či zbytky maziv z předchozích operací. Ty se nejčastěji odstraňují otryskáním povrchu, který je očištěn proudem drobných abrazivních částic, jež jsou tvořeny ocelovými broky a granulátem, křemičitým pískem, keramickými kuličkami, nebo drceným korundem. Upravený povrch poté zajišťuje lepší přilnavost mazacích vrstev, nebo fosfátových povlaků. Větší velikost částic nemusí zajistit kvalitní očištění naopak menší se zase mohou zarývat do povrchu polotovaru. Proto se nejčastěji používají abrazivní částice o velikosti zhruba 1 mm.

Dále je důležité správné tepelné zpracování, které se využívá ke snížení pevnosti a dosažení lepší tažnosti materiálu. To lze provádět jak na začátku procesu, tak i mezi jednotlivými operacemi a nejčastěji se využívá průběžných nebo rotačních pecí. Konkrétně u tváření za studena se nejčastěji uplatňují tři způsoby (obr. 14):

- Žihání naměkko – se využívá ke snížení tvrdosti materiálu tak, aby se dosáhlo vhodných mechanických a fyzikálních vlastností. Materiál je ohříván na teplotu okolo  $A_{c1}$  po dobu několika hodin a následně se pomalu



Obr. 13 Řezání polotovaru na kotoučové pile [16]



Obr. 14 Metody žihání rozděleny dle teplot [9]



ochlazuje v peci. To umožňuje přeměnu lamelárního perlitu na perlit globulární. Vzniklá struktura je vhodná jak pro tváření za studena, tak i pro snazší obrábění.

- Normalizační žihání – se používá pro homogenizaci a zjemnění hrubozrnné struktury, která vzniká při tváření nebo při žihání za vysokých teplot. Provádí se u podeutektoidních ocelí ohřevem o 30 až 50 °C nad teplotu  $A_{c3}$  a následným pozvolným ochlazením na vzduchu.
- Rekrystalizační žihání – tento druh tepelného zpracování se provádí při teplotách pod  $A_{c1}$  (400 až 700 °C) a nastavení jeho parametrů se odvíjí od velikosti deformace materiálu. Rekrystalizační žihání umožňuje úplnou obměnu zdeformovaných zrn na nová, aniž by došlo k fázové přeměně. Dosáhne se obnovení mechanických vlastností materiálu, snižuje se tvrdost a pevnost, a naopak roste tažnost. Nejčastěji se používá mezi operacemi tváření za studena, kdy dochází k velkým přetvořením materiálu a bez obnovy mechanických vlastností by docházelo k prasklinám výtažku. Lze ji však využít i na začátku procesu zejména pro válcované, či mechanicky poškozené polotovary.

Po tepelném zpracování následuje povrchová úprava polotovaru, která s použitím různých maziv zlepšuje podmínky tvářecího procesu. Jedná se hlavně o snížení tření, které má za následek snížení protlačovací síly až o 10 %, deformačního odporu, lepší kvalitu povrchu protlačku a delší životnost nástroje. Aby mazivo na povrchu polotovaru lépe ulpívalo, vytváří se na něm speciální nosná vrstva, do které snadno zateče a udrží se tak mezi materiálem a nástrojem v průběhu celého procesu.

Nejčastěji se používá fosfátová vrstva, která je nerozpustná a má nevodivé vlastnosti. Díky pórovité struktuře zajišťuje lepší přilnavost nátěrů, korozní odolnost, a především pro tento případ je dobrým nosičem maziv. Metoda je založena na vylučování fosforečnanů různých kovů z roztoku kyseliny fosforečné a alkalických kovů s kovovými kationty na povrch polotovaru. Podle druhů kovů a různých příměsí se dají fosfátové povlaky dále dělit na železnaté, zinečnaté, manganové apod. Aby byl proces úspěšný, má fosfátování stanovený postup (obr. 15):

- Mechanické odstranění nečistot (okuje, otřepy apod.).
- Odmaštění – se provádí v alkalické lázni (např. hydroxid sodný – louh) o teplotě nad 50 °C. Provádí se hrubé a čisté odmaštění, aby došlo ke kvalitnímu odstranění všech nečistot – tuků, prachu a jiných mazacích látek. Snahou je získat čistý a smáčivý povrch.
- Oplach horkou vodou – pro oplach se používá užitková voda, která se odvádí do sběrné nádrže a následně se čistí v neutralizační stanici.
- Moření – je způsob odstranění oxidů z povrchu materiálu, které se vyskytují ve formě okujů a koroze. Jsou rozpouštěny v roztoku kyseliny sírové o koncentraci okolo 10 % a teplotě 80 °C.
- Oplach horkou vodou průtočný.
- Aktivace – ošetření povrchu aktivačním roztokem, díky kterému na povrchu ulpívají částčky solí, které iniciují nukleaci. Umožňují tak vznik jemnější struktury povlaku.

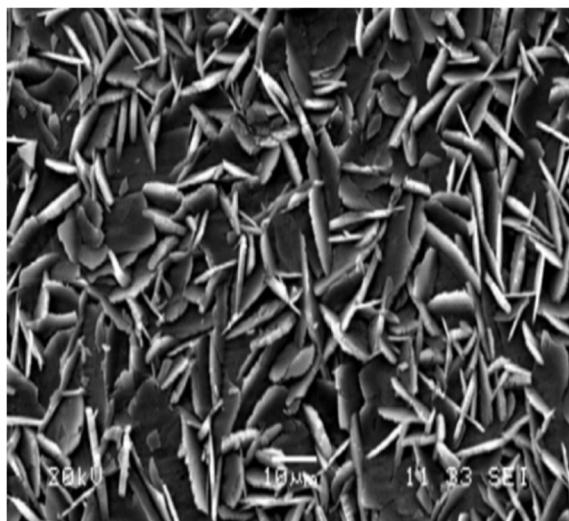


Obr. 15 Fosfátová linka [17]



- Fosfátování – ponořením očištěné součásti do roztoku kyseliny fosforečné se na jejím povrchu vytvoří vrstva solí již zmíněné kyseliny. Teplota lázně se pohybuje od 40 do 90 °C a doba procesu se pohybuje od 4 do 10 min. Vzniklá pórovitá vrstva jejíž tloušťka se pohybuje v rámci mikrometrů je tak připravená na nanesení maziva. Její detail je vidět na obrázku 17.
- Oplach horkou vodou.
- Neutralizace – odstranění kyselého a zásaditého prostředí, aby se zastavily veškeré chemické děje.
- Mazání – probíhá ponořením do určitého maziva. Nejčastějším způsobem je mýdlování, kde se fosfátová vrstva sytí stearátem sodným, který se po reakci s fosforečnanem zinečnatým mění na stearát zinečnatý. Ten má skvělé mazací vlastnosti. Další možností je molykování, kde se na povrchu součásti vytvoří sulfid molybdeničitý.
- Sušení – probíhá při teplotě 100 až 120 °C.

Po nanesení maziv, které jsou většinou na bázi stearátů nebo sulfidů, na fosfátovou vrstvu vzniká tzv. kovové mýdlo, které má nejlepší vlastnosti pro tvářecí proces. Takto připravené polotovary je možno vidět na obrázku 16.



Obr. 17 Mikroskopický snímek fosfátové vrstvy [18]



Obr. 16 Mýdlované součástky [vl. Tvorba]

Zvolení druhu maziva však závislé na mnoha okolnostech, zejména pak složitosti procesu a velikosti přetvárných sil. Lze je rozdělit na několik druhů:

- Maziva na bázi mýdel – jejich charakteristickou vlastností je velká odolnost vůči vysokým tlakům a nejčastěji se používají s fosfátovou vrstvou. Dají se používat pouze do teplot nepřekračujících 250 °C.
- Pevná maziva – jeden z nejpoužívanějších pevných maziv je grafit, který se používá v disperzi s vodou a mazivem. Má kvalitní mazací vlastnosti i při vysokých tlacích a teplotách okolo 800 °C.
- Oleje – dělí se na minerální a syntetické a často se používají s nějakými přísadami jako jsou kovová mýdla nebo aditiva na bázi síry.
- Vodní emulze – používají se tam, kde nedochází k vysokým tlakům. V procesu mají spíše chladicí účinky. Využívají se pro výrobu s vysokou rychlostí a malým přetvořením.

## 2.2 Deformace, napětí a síla [1], [3], [15]

Pro řešení úloh tvářecích procesů existuje mnoho způsobů, které se dají rozdělit do dvou základních metod. Je to metoda analytická, která vychází z odvozených rovnic a metoda experimentálně analytická, která kombinuje stanovené rovnice s experimentálně určenými výsledky. Jedním z nejpoužívanějších způsobů je metoda rovinných řezů, která patří do analytické části. Používá se pro výpočty deformačních přetvárných odporů a tvářecích sil pomocí diferenciálních rovnic rovnováhy při použití následujících zjednodušení:

- Tvářený materiál je izotropní spojité kontinuum.
- Směry hlavních napětí ve všech bodech tělesa jsou totožné se směry souřadných os.
- Prostorové stavy napjatosti a přetvoření jsou převedeny na rovinné a osově symetrické úlohy.
- Nekonečně tenké rovinné řezy zachovávají svůj tvar i po přetvoření.
- Vliv tření je omezen na stykové funkční plochy mezi nástrojem a materiálem.
- Přetvoření a jeho rychlost se na základě smluvních podmínek stanovují pro vyjmutý element tělesa.

V případě sduženého protlačování je nutné daný proces rozdělit na část dopředného a část zpětného protlačování. Pro správné nastavení procesu je nutno vypočítat hodnoty přetvoření a napětí, ze kterých vyplývá měrná přetvárná práce, počet operací nebo tvářecí síla.

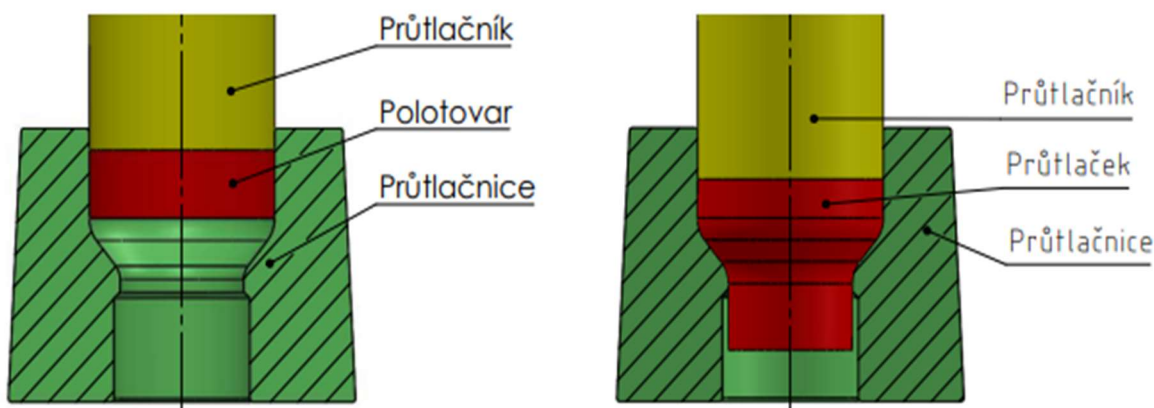
### 2.2.1 Dopředné protlačování [1], [2], [3], [5], [21], [34],

Dopředné protlačování je základní metodou objemového tváření, která se používá nejen na výrobu tyčí a profilů v hutnickém průmyslu, ale také k výrobě hřídelí, čepů, či šroubů (obr. 18). Materiál je zde tlačén pomocí průtlačníku přes tvarový otvor v průtlačnici, který mu dává výsledný tvar, teče tedy ve směru pohybu nástroje. Nejjednodušší je případ rotačně symetrické průtlačnice s redukčním kuzelem, který je zobrazen na obrázku 19.

Délka výlisku nesouvisí s délkou průtlačníku, díky tomu lze vyrábět dlouhé a tenké součásti, kde poměr průměru s délkou dosahuje poměru až 24:1. V praxi se běžně dosahuje poměrného přetvoření průměru kolem 70 %, ale teoreticky lze rozměr redukovat až o 90 %. Pokud se překoná 30 % je nutné použít uzavřenou průtlačnici.



Obr. 18 Příklady součástí vyrobené dop. protlačováním [21]



Obr. 19 Dopředné protlačování [2]

Přetvoření je bezrozměrná veličina určující míru velikosti deformace materiálu. Je hlavním ukazatelem při volbě počtu tvářecích operací a vypočítá se:

- logaritmické přetvoření (obr. 21):

$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0}{S_1}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2}{D_1^2}\right) [-] \quad (2.3)$$

kde:  $S_0$  – výchozí průřez [ $\text{mm}^2$ ]

$S_1$  – konečný průřez [ $\text{mm}^2$ ]

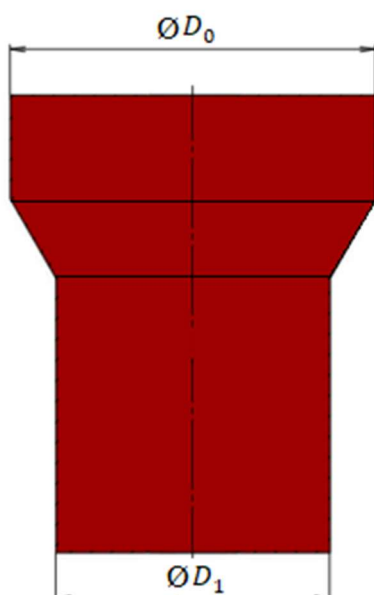
$D_0$  – výchozí průměr [mm]

$D_1$  – konečný průměr [mm]

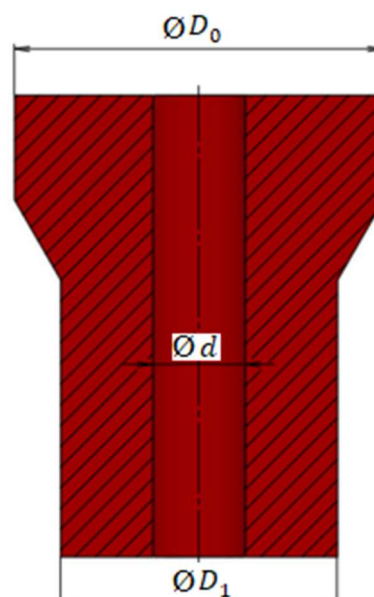
- logaritmické přetvoření dutého tělesa (obr. 20):

$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0}{S_1}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2 - d^2}{D_1^2 - d^2}\right) [-] \quad (2.4)$$

kde:  $d$  – vnitřní průměr [mm]



Obr. 21 Rozměry protlačku pro dop. protlačování [1]



Obr. 20 Rozměry protlačku pro duté dop. protlačování [1]

Další potřebnou hodnotou pro návrh celého procesu tváření je přirozený přetvárný odpor ' $\sigma_p$ '. Jedná se o vnitřní odpor materiálu, který působí proti vnějším silám. Je určen za podmínek jednoosé napjatosti v okamžiku, kdy dojde k počátku plastické deformace, což ovlivňuje hned několik faktorů:

- přetvoření,
- mez kluzu,
- mez pevnosti,
- chemické složení,
- teplota tváření,
- rychlost přetvoření.

Lze ho tedy získat z experimentálních zkoušek, nebo z grafů, které jsou definovány pro jednotlivé oceli a ukazují závislost přirozeného přetvárného odporu na přetvoření a teplotě materiálu.

Z přirozeného přetvárného odporu vychází deformační odpor, který je větší o vliv pasivních technologických odporů, které nastávají při změně tvaru tvářeného tělesa. Jedná se například o tření mezi materiálem a nástrojem, vliv změny tvaru nebo teplotních podmínek, či nerovnoměrnou napjatost. Analytické řešení dle Gubkina vychází z podmínek rotační symetrie a odvozuje se od geometrického modelu zobrazeného na obrázku 23. Metoda rozděluje průtláčnici na tři části, kde pomocí rovnováhy sil a diferenciálních rovnic řeší jednotlivá napětí:

A) Kalibrační očko (obr. 22)

Radiální tlak, který působí na stěnu očka je maximálně roven přirozenému přetvárnému odporu:

$$\sigma_{r3(G)} = -\sigma_p \quad (2.5)$$

kde:  $\sigma_p$  – přirozený přetvárný odpor [MPa]

$\sigma_{r3(G)}$  – radiální napětí [MPa]

Z toho vychází rovnice pro smykové třecí napětí

$$\tau_{f3(G)} = f_3 \cdot \sigma_{r3(G)} = -f_3 \cdot \sigma_p \quad (2.6)$$

kde:  $f_3$  – součinitel tření očka [–]

A velikost osového napětí na průřezu očka je závislé na okamžité vzdálenosti 'z' a je rovno:

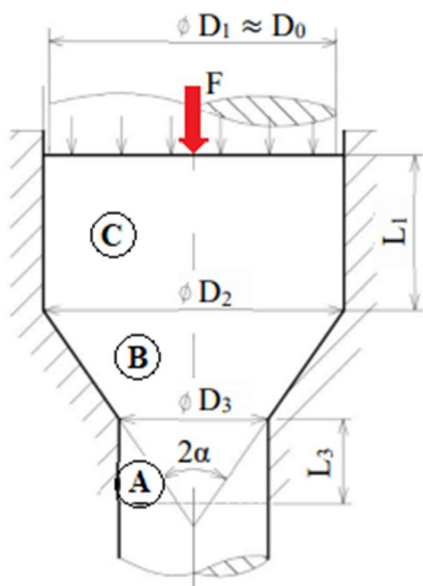
$$\sigma_{z3(G)} = -\sigma_p \frac{4f_3}{D_3} \cdot z \quad (2.7)$$

kde: z – vzdálenost od konce očka v ose z [mm]

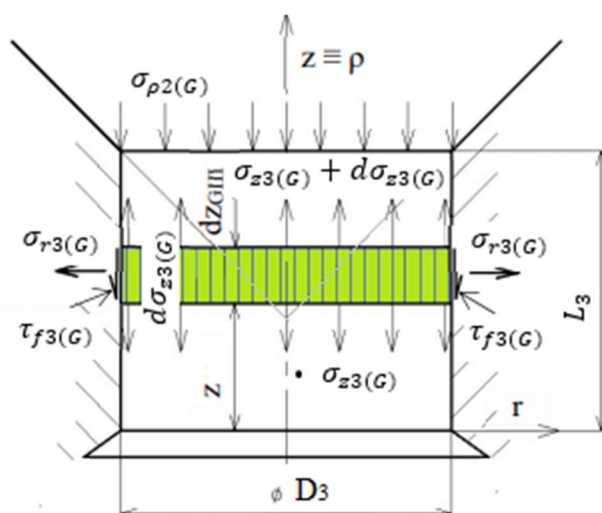
Pokud je 'z' rovno 'L<sub>3</sub>' potom je osové napětí rovno osovému napětí na spodu kuželové průtláčnice:

$$\sigma_{\rho2(G)} = \sigma_{z3(G)} = -\sigma_p \frac{4f_3}{D_3} \cdot L_3 \quad (2.8)$$

kde: L<sub>3</sub> – výška očka [mm]



Obr. 23 Geometrický model průtláčnice [1]



Obr. 22 Kalibrační očko [1]

B) Kuželová průtlačnice (obr. 25)

Pro řešení kuželové průtlačnice se použije obdobný postup, kde se z rovnováhy sil získá diferenciální rovnice, která se upraví pomocí podmínky plasticity, Columbova vztahu pro smykové napětí od tření. Potom je obdržén vztah pro osově napětí v redukčním kuželu:

$$\sigma_{\rho 2(G)} = -\sigma_{PS} \left[ \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{PS}} \cdot 4 \cdot f_3 \frac{L_3}{D_3} + \frac{tg\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left( \frac{D}{D_3} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{tg\alpha}} - \frac{tg\alpha}{f_2} - 1 \right] \quad (2.10)$$

kde:  $\sigma_{PS}$  – střední přirozený přetvárný odpor [MPa]

$\alpha$  – úhel kuželové průtlačnice [°]

$f_3$  – součinitel tření kuželové průtlačnice [–]

$D$  – průměr deskového elementu [mm]

Hodnota středního přirozeného přetvárného odporu a je rovna:

$$\sigma_{PS} = \frac{1000 \cdot A_j}{\varphi_3 - \varphi_2} \quad (2.11)$$

kde:  $A_j$  – měrná přetvárná práce [J·mm<sup>-3</sup>]

Napětí na stěně kuželu se určí podle rovnice:

$$\sigma_{\varphi 2(G)} = \sigma_{\rho 2(G)} + \sigma_{p 2(G)} \quad (2.12)$$

A smykové napětí je rovno:

$$\tau_{f 2(G)} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi 2(G)} \quad (2.13)$$

kde:  $f_2$  – součinitel tření kuželové průtlačnice [–]

C) Válcový kontejner (obr. 24)

Osově napětí ve válcovém kontejneru se podle Gubkina vypočítá jako:

$$\sigma_{z 1(G)} = \sigma_{\rho 2(G)} \cdot e^{\frac{\mu \cdot 4 \cdot f_1}{(1-\mu) \cdot D_1} \cdot z} \quad (2.14)$$

Radiální napětí je rovno:

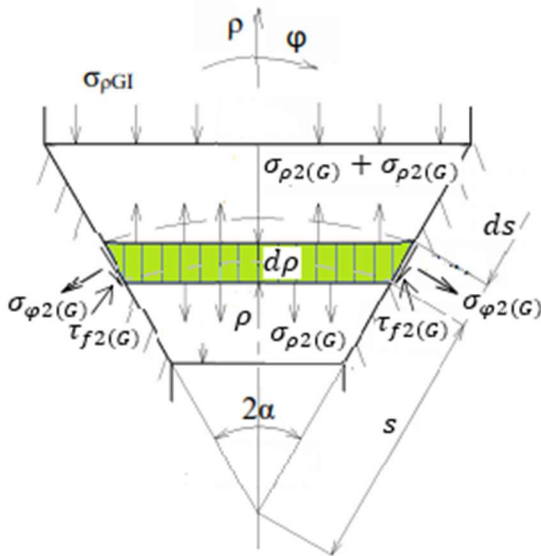
$$\sigma_{r I(G)} = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_{z 1(G)} \quad (2.15)$$

Kde:  $\mu$  – poissonovo číslo,  $\mu = 0,3$

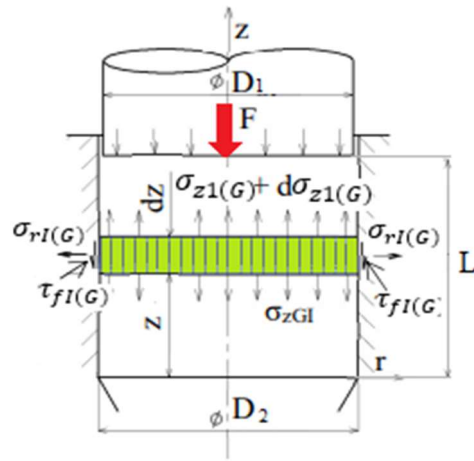
A poslední smykové napětí se rovná:

$$\tau_{f I(G)} = f_1 \cdot \sigma_{r I(G)} \quad (2.16)$$

kde:  $f_1$  – součinitel tření válcového kontejneru [–]



Obr. 25 Kuželová průtlačnice [1]



Obr. 24 Válcový kontejner [1]

Pro snazší výpočet deformačního odporu pro celou průtláčnici existuje mnoho vzorců. Nejpoužívanější z nich jsou:

- vztah dle Feldmanna pro plné těleso:

$$\sigma_{d_{Feld}} = \sigma_{PS} \left[ \left( 1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \cdot \ln \left( \frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{D_3 L_3}{D_1^2} \sigma_{PS} + 4f_1 \frac{L_1}{D_1} \sigma_{P1} \text{ [MPa]} \quad (2.17)$$

kde:  $\sigma_{PS}$  – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa]

$\hat{\alpha}$  – úhel kuželové části [rad]

$\sigma_{P1}$  – přirozený přetvárný odpor v zásobníku [MPa]

- vztah dle Feldmanna pro duté těleso:

$$\sigma_{d_{FeldD}} = \sigma_{PS2} \varphi \left( 1 + \frac{1\hat{\alpha}}{2\varphi} + 2\frac{f}{\hat{\alpha}} \right) + \pi D_1 L_1 \frac{f}{S_1} \sigma_{P1} \text{ [MPa]} \quad (2.18)$$

kde:  $\sigma_{P2}$  – přirozený přetvárný odpor po deformaci [MPa]

- vztah dle Siebela:

$$\sigma_{d_{SiebelDP}} = \sigma_{PS2} \left[ \ln \left( \frac{D_1}{D_3} \right)^2 + 0,6 \right] \cdot \left[ 1,25 + 2f_2 \cdot \sqrt{4 \left( \frac{L_0}{D_2} \right)^2} \right] \quad (2.19)$$

Přetvárná práce – je definovaná jako velikost deformační síly na celkové dráze stroje. Její velikost se vypočítá jako:

$$A = \int_0^z \sigma_d \cdot S \cdot dz = \int_0^z \sigma_d \cdot \frac{V}{h} \cdot dz = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V \quad (2.20)$$

kde: A – přetvárná práce [J]

$\sigma_d$  – deformační odpor [MPa]

Pokud je vztažena na jednotku objemu tvářeného materiálu, jedná se o takzvanou měrnou přetvárnou práci  $A_j$ .

Další důležitou veličinou v procesu protlačování je velikost přetvárné síly, která je nutná k překonání deformačního odporu a k následnému přetvoření materiálu. Jmenovitá síla stroje musí být vždy větší než tato síla a vypočítá se jako násobek deformačního odporu a velikost průřezu tvářeného materiálu pod nástrojem:

$$F_p = \sigma_d \cdot S \quad (2.21)$$

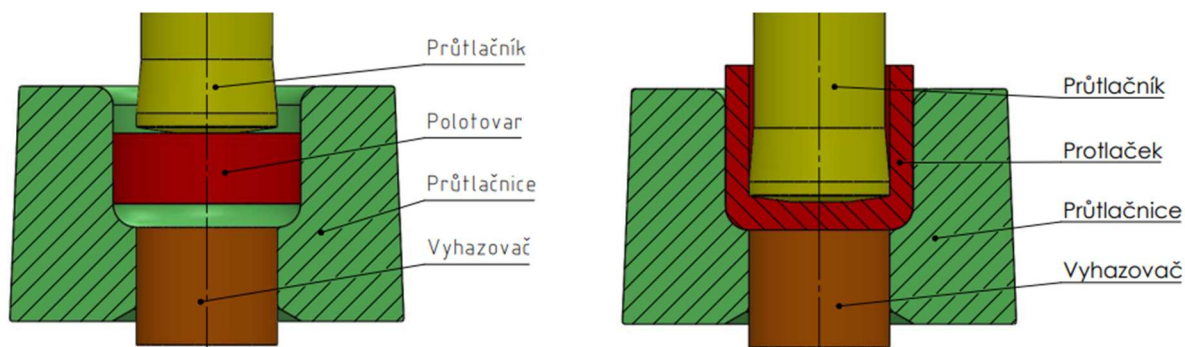
## 2.2.2 Zpětné protlačování [1], [2], [3], [5], [6], [14], [15],

Princip zpětného kvazistatického protlačování je založen na opačném tečení materiálu (obr. 26), než tomu bylo u dopředného. Po vniknutí průtláčnicku do polotovaru je materiál přemísťován proti směru pohybu nástroje.

Tímto způsobem se nejčastěji vyrábí výtažky kalíškového typu (nádoby a pouzdra), které mohou mít různě tvarované dno podle tvaru nástroje. Jejich délka je však omezena délkou průtláčnicku. Jelikož by mohlo dojít ke ztrátě vzpěrné stability, doporučuje se maximální poměr délky k průměru zhruba 3:1. Přetvoření by zde nemělo přesáhnout 70 %, při překročení této



hranice dochází ke značným poškozením nástrojů. Je dokázáno, že při stejném přetvoření je deformační odpor větší u zpětného protlačování než u dopředného.



Obr. 26 Průběh zpětného protlačování [2]

Při zjišťování potřebné síly k protlačení polotovaru se používá obdobný postup jako u dopředného protlačování (obr. 27):

- logaritmické přetvoření:

$$\varphi = \ln \left( \frac{S_0}{S_0 - S_1} \right) = \ln \left( \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} \right) [-] \quad (2.22)$$

kde:  $S_0$  – výchozí průřez [ $\text{mm}^2$ ]

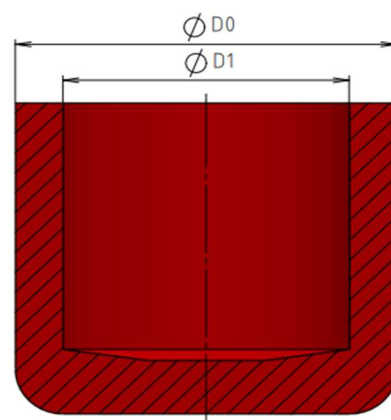
$S_1$  – konečný průřez [ $\text{mm}^2$ ]

$D_0$  – výchozí průměr [mm]

$D_1$  – konečný průměr [mm]

- poměrné přetvoření:

$$\varepsilon = \frac{S_1}{S_0} = \frac{D_1^2}{D_0^2} [-] \quad (2.23)$$



Obr. 27 Rozměry protlačku [1]

Základní metodou, jak zjistit deformační odpor u zpětného protlačování je řešení podle Dippera, který tento proces rozdělil na dvojité pětování, a to na oblast 1 pod průtlačníkem a prostor radiálního napětí mezi oblastmi 1 a 2. V oblasti 3, nad čelem průtlačníku, už k deformaci nedochází a materiál je zde pouze vysouván (obr. 28).

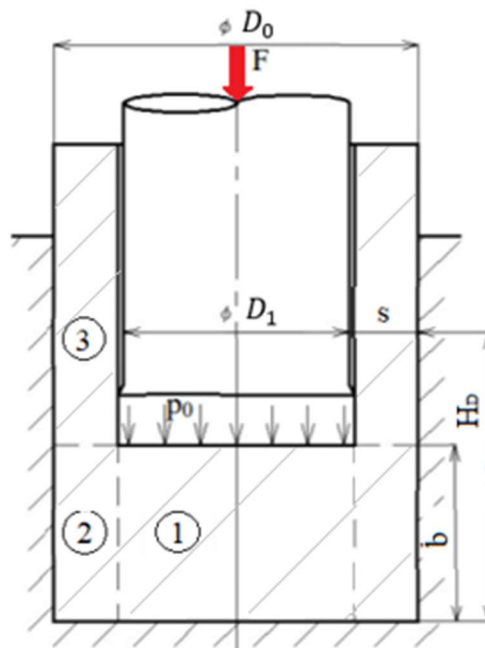
Dipper také definoval předpoklady pro řešení:

- Poměrné přetvoření musí být větší než 0,5.
- Součinitel plastického tření mezi oblastmi 1 a 2 je roven  $f_2 = 0,5$ .
- Tření mezi polotovarem a nástrojem je rovno kluznému tření dle Coulomba.
- Střední součinitel tření je roven:

$$f_{2stř} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) \quad (2.24)$$

kde:  $f_{2stř}$  – součinitel tření [-]

Dipperův výpočet využívá geometrického modelu na obrázku 29, kde vychází z rovnováhy sil pro oblasti 1 a 2 a následných diferenciálních rovnic.



Obr. 28 Zpětné protlačování [1]

Pomocí okrajových podmínek je rovnice upravena na rovnice jednotlivých napětí:

A) Oblast 2:

- osově napětí:

$$\sigma_{z2(D)} = -\sigma_P \frac{4 \cdot f_{2str}}{D - d} (b - z) \quad (2.25)$$

kde:  $b$  – výška dna [mm]  
 $z$  – vzdálenost od průtláčnice [mm]

- radiální napětí:

$$\sigma_{r2(D)} = -\sigma_P \left[ \frac{4 \cdot f_{2str}}{D - d} (b - z) + 1 \right] \quad (2.26)$$

- Střední radiální napětí:

$$\sigma_{r2str(D)} = -\sigma_{P2str} \left[ \frac{4 \cdot f_{2str}}{D - d} (b - z) + 1 \right] \quad (2.27)$$

- smykové napětí:

$$\tau_{f2(D)} = \sigma_P \cdot f_{2str} \quad (2.28)$$

B) Oblast 1:

- osově napětí:

$$\sigma_{z1(D)} = \sigma_{r2str(D)} - \left[ 1 + \frac{2 \cdot f_1}{b} \left( \frac{d}{2} - r \right) \right] \cdot \sigma_p \quad (2.29)$$

- radiální napětí:

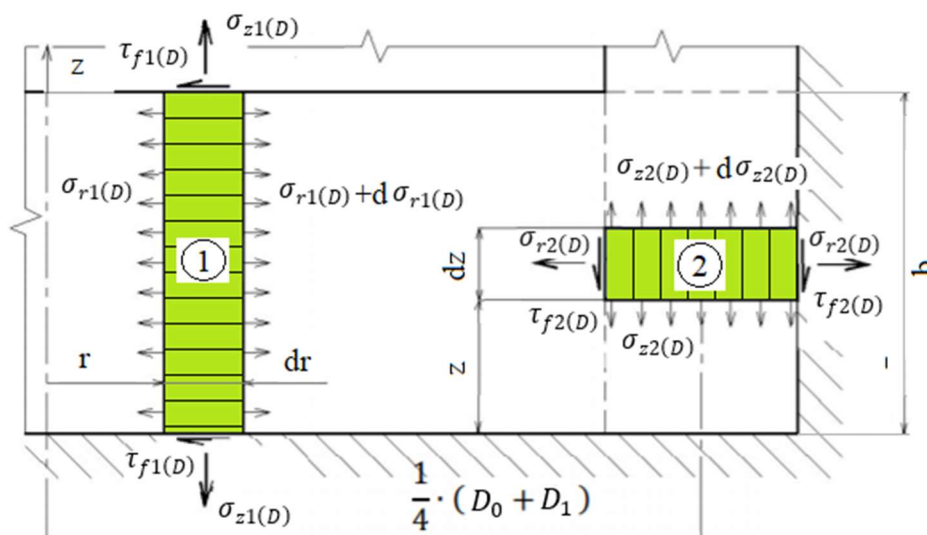
$$\sigma_{r1(D)} = \sigma_{r2str(D)} - \frac{2 \cdot f_1}{b} \left( \frac{d}{2} - r \right) \cdot \sigma_p \quad (2.30)$$

- smykové napětí:

$$\tau_{f1(D)} = \sigma_{z1(D)} \cdot f_1 \quad (2.31)$$

Potom se deformační odpor dle Dippera vypočítá jako:

$$\sigma_{dDIPPER} = \sigma_P \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b} \right) + \sigma_{Pstr} \left( 1 + \frac{2 \cdot f_{2str}}{D_0 - D_1} \cdot b \right) \quad (2.32)$$



Obr. 29 Geometrický model zpětného potlačování [1]



Kromě Dippera se výpočtem deformačního odporu pro celou průtláčnici zabývali další lidé. Nejčastěji používané vzorce jsou:

- deformační odpor dle Siebla:

$$\sigma_{d_{Siebel}} = 1,152 \cdot \sigma_P \cdot \frac{S_0}{S_1} \left( \log \frac{S_0}{S_0 - S_1} + \frac{S_0}{S_0 - S_1} \cdot \log \frac{S_0}{S_1} + \log \frac{S_0}{S_0 - S_1} \right) \quad (2.33)$$

- deformační odpor dle Sachse:

$$\sigma_{d_{Sachs}} = 1,58 \cdot \sigma_P \cdot \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} \quad (2.34)$$

Protlačovací síla se vypočítá stejně jakou u dopředného protlačování:

$$F_P = \sigma_d \cdot S \quad (2.35)$$

V tabulce 4 jsou zaznamenány hraniční intervaly pro hodnoty přetvoření, kdy ještě nedojde k poškození protlačku.

Tabulka 3 Mezní intervaly přetvoření [5]

	$\varepsilon$ [–]	$\varphi$ [–]
<b>Dopředné protlačování</b>	0,40 až 0,75	0,51 až 1,4
<b>Zpětné protlačování</b>	0,30 až 0,90	0,37 až 3,0

## 2.3 Nástroje [1], [5], [6], [22], [23], [24], [25], [36],

Při konstrukci nástroje pro objemové tváření je nutné dodržet hned několik náležitostí, které jsou nezbytné pro jeho funkci:

- Navrhnout nástrojovou sestavu tak, aby její montáž byla co nejsnadnější a dala se provádět mimo pracovní prostor lisu. Díky tomu nebude docházet k velkým prostojům při změně výroby. Také je důležité umožnit jednoduchou výměnu funkčních částí sestavy. Klíčovou roli také hraje souosost všech částí, bez níž by docházelo k předčasnému opotřebení nástroje.
- Docílit co největší tuhosti nástrojové sestavy, aby nedocházelo k nepřesnostem a předčasným opotřebením. Lepší tuhosti lze docílit pomocí větších a přesnějších dosedacích ploch jednotlivých částí soustavy, volbou materiálu a v neposlední řadě použitím opěrných desek, které jsou kaleny na nejvyšší tvrdost.
- Pro zajištění kvalitního toku materiálu vhodně volit různé poloměry a přechody. Navrhnout správné tolerance a kvalitní funkční plochy nástroje.
- V neposlední řadě je snaha navrhnout nástrojovou sestavu tak, aby byla výroba co nejvíce automatická, čehož se dá dosáhnout pomocí postupových nástrojů, nebo vhodně umístěných vyhazovačů a stěračů.

Jednou z nejdůležitějších vlastností nástroje je jeho životnost, která udává množství vyrobených kusů, než dojde k jeho opotřebení nebo poškození. Při protlačování ocelového materiálu však dochází dříve k prasknutí, kvůli působení vysokých tlaků. Další faktory, které mají na životnost nástroje vliv jsou metoda protlačování, geometrický model, materiál, přesnost protlačku či způsob mazání. Při nesprávném tepelném zpracování nástroje může docházet k dřívějšímu poškození.

Základní dvě části nástroje pro protlačování jsou průtláčník a průtláčnice. Jedná se o funkční části, které musí vydržet vysoké tvářecí tlaky a zajistit dlouhou životnost. Nástroj může být také doplněn vyhazovacími kolíky, které slouží ke snazšímu vyjmutí protlačku z dutiny průtláčnice.

Materiály pro nástrojové sestavy, se z velké většiny, volí vysokolegované nástrojové oceli z třídy 19. Aby vydržely vysoké nároky, je nutné jejich tepelné zpracování, většinou se jedná o zušlechťování na tvrdost 40 až 60 HRC. Funkční plochy nástrojů jsou broušené, či leštěné

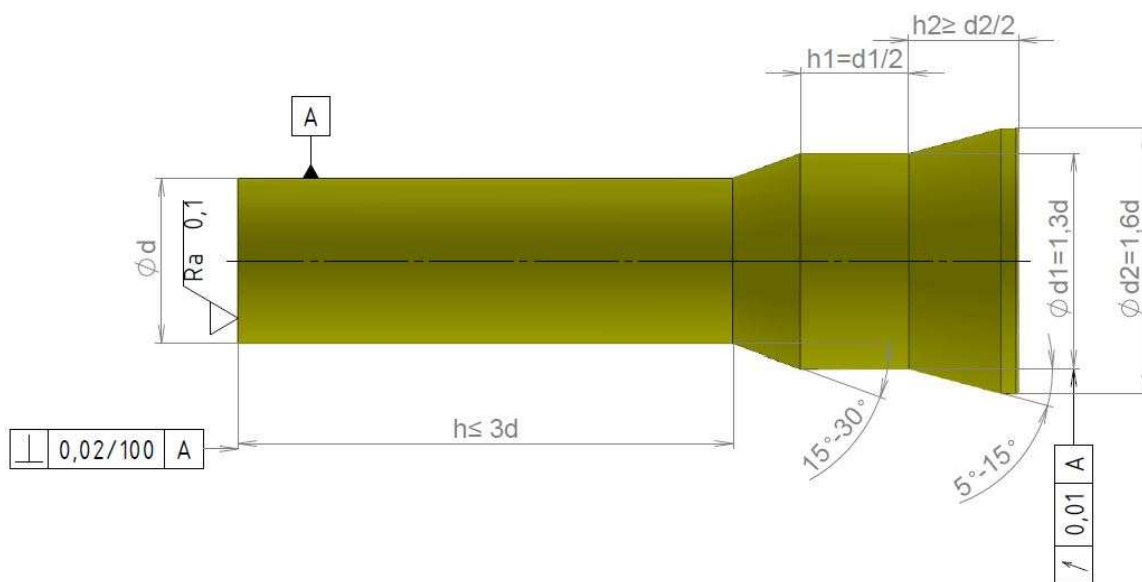
a často se používá i povlakování. Vyžívá se metoda PVD, která k provedení nepotřebuje vysoké teploty, a tak nedochází k znehodnocení tepelně zpracovaného materiálu. Obvykle používané materiály v nástrojových sestavách jsou zobrazeny v tabulce 5.

Tabulka 4 Materiály používané v nástrojích sestavy [22], [23], [24], [25],

Díl nástroje		Materiál
Průtlačník		19 314, 19 315, 19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 820, 19 830
Průtlačnice		19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 655, 19 735, 19 820, 19 830
Objímka	Vnitřní	19 550, 19 655, 19 662
	Vnější	19 256, 16 640, 15 261
Vyhazovače a kolíky		19 314, 19 426, 19 550, 19 569, 19 820, 19 830
Opěrné a vodící desky		19 314, 19 356, 19 550

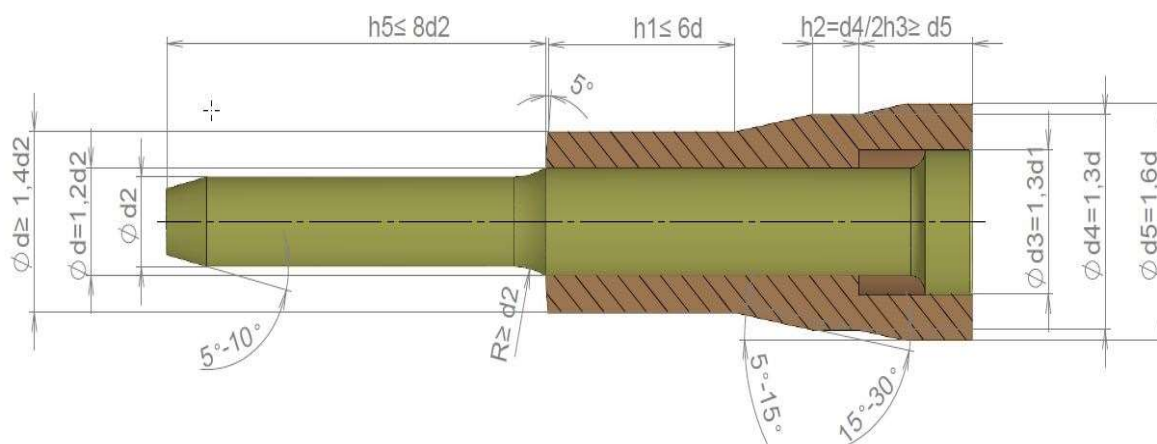
### 2.3.1 Nástroje pro dopředné protlačování [1], [5], [6], [22], [23], [24], [25], [37],

- Průtlačník – skládá se většinou ze dvou částí, a to upínací hlavy a dříku. Upínací hlava má obvykle válcový nebo kuželový tvar s danými rozměry a slouží k upnutí nástroje do stroje. Dřík válcového tvaru s plochým čelem je v přímém kontaktu s tvářeným materiálem. Aby nedošlo ke ztrátě vzpěrné stability průtlačníku, musí být délka dříku maximálně trojnásobek jeho průměru. Důležité je také dodržet rovnoběžnost a kolmost stěn, a také přechod mezi dříkem a upínací hlavou nesmí mít skokovou změnu průměru, aby nedocházelo ke koncentraci napětí. Základní tvary a rozměry jednoduchých průtlačníků lze vidět na obrázku 30.



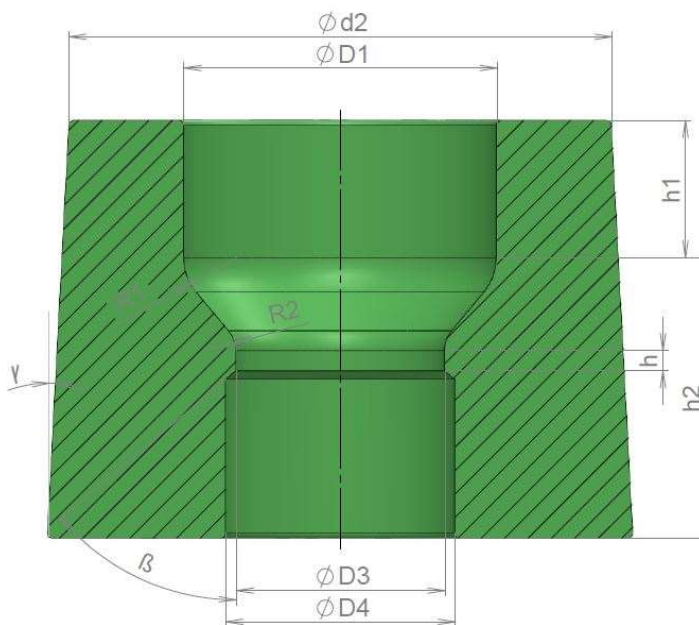
Obr. 30 Průtlačník pro dop. protlačování [1]

V běžné praxi se také používají dělené průtlačníky, které umožňují snadnou výměnu opotřeбенé části, a také použití levnějšího materiálu na jeho upínací část. Jejich tvar a základní rozměry jsou na obrázku 31.



Obr. 31 Dělený průtlačník [1]

- Průtlačnice – dělí se na tři části, a to na válcový kontejner, kde se ukládá polotovar, redukční část, která způsobuje deformaci materiálu a kalibrační očko, které zvyšuje přesnost protlačku. Jedním z nejdůležitějších činitelů v procesu je tvar a rozměr redukční části. Ta má většinou tvar kužele, který je nejsnazší pro výrobu. Jak lze poznat z předchozích vztahů, velikost redukčního úhlu má značný vliv na deformační odpor. Důležité je také zaoblení, nebo zkosení horní hrany pro snazší vkládání polotovaru do dutiny průtlačnice. Základní tvar a rozměry průtlačnice lze vidět na obrázku 32 a v tabulce 6. Průtlačnice lze dále modifikovat pomocí vyměnitelné vložky, která funguje podobně jako dělený průtlačník a umožňuje tak snazší a levnější výměnu opotřeбенé průtlačnice. Obdobně funguje dělená průtlačnice, která také umožňuje zmenšení vrubového účinku. Zde je nutné zajistit dostatečné dosednutí obou částí na sebe, aby materiál nezatékal mezi dělicí rovinu.



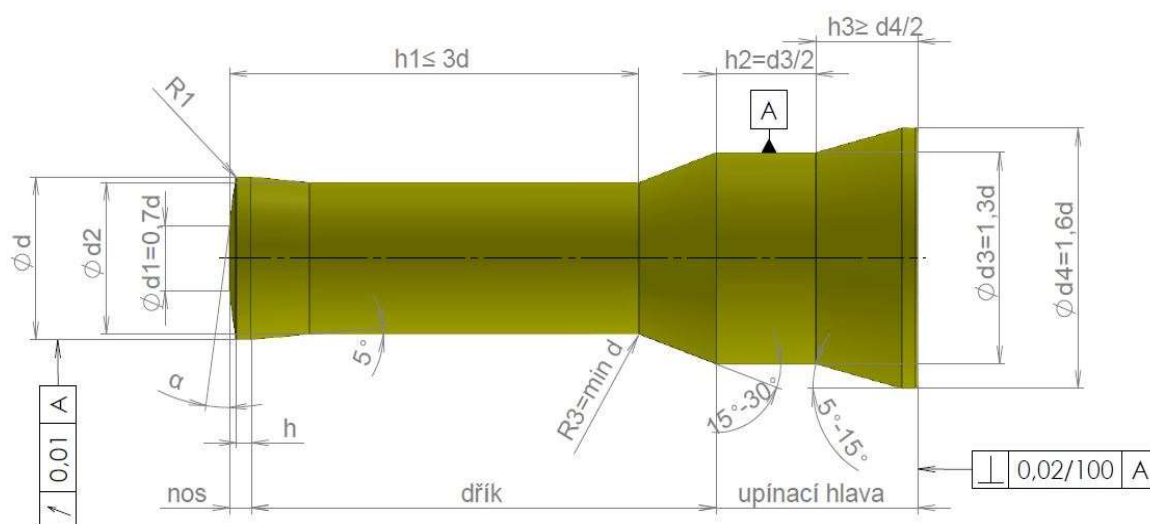
Obr. 32 Průtlačnice pro dop. protlačování [1]

Tabulka 5 Rozměry průtlačnice pro dop. protlačování [1]

Teplota tváření	20 °C	(200 – 400) °C
D <sub>4</sub>	$D_3 + (0,1 \text{ až } 0,2)$	$D_3 + (0,1 \text{ až } 0,2)$
h	$0,5 \cdot \sqrt{D_3}$	2 – 3 mm
2	30° – 90°	60° – 120°
R <sub>1</sub>	$(D_1 - D_3)/2$	
R <sub>2</sub>	$(0,05 \text{ až } 0,1) \cdot D_3$	1 – 2 mm
R <sub>3</sub>	Asi $0,15 \cdot D_1$	
H <sub>2</sub>	Min $0,7 \cdot D_1$	
γ	1° – 2°	
β	5° – 10°	

### 2.3.2 Nástroje pro zpětné protlačování [1], [5], [6], [22], [23], [24], [25],

Průtlačník pro zpětné protlačování se skládá, na rozdíl od dopředného protlačování, ze tří částí, a to hlava, dřík a nos, který je nejdůležitější částí v procesu. Nos je vlastně mírně kuželovité čelo, které je určeno úhlem 'α'. Jeho velikost závisí na tvaru protlačku, ale také na tvářecí teplotě. Součástí nosu je také kalibrační část, která pomáhá tvarovat výslednou součást. Základní tvar a rozměry lze vidět na obrázku 33 a v tabulce 7.

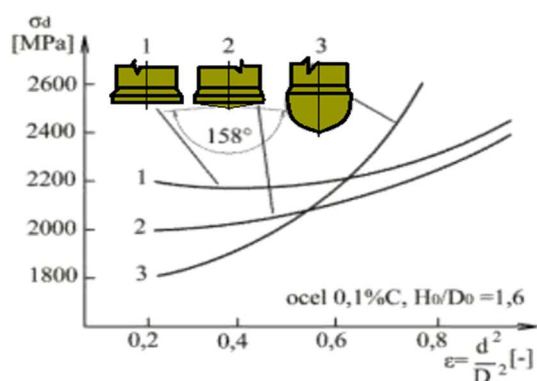


Obr. 33 Průtlačník pro zpět. Protlačování [1]

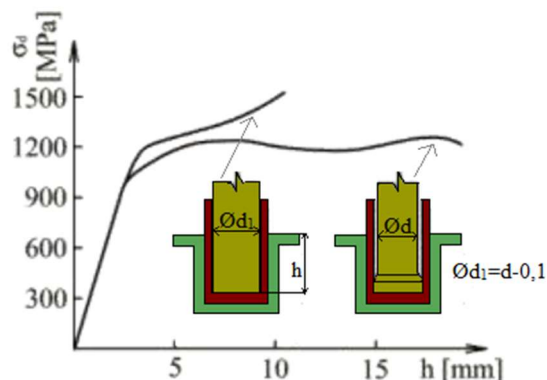
Tabulka 6 Rozměry průtlačníku pro zpět. Protlačování [1]

Teplota tváření	20 °C	(200 - 400) °C
d	$d - (0,1 \text{ až } 0,2)$	$d - (0,2 \text{ až } 0,5)$
h	$0,5 \cdot \sqrt{d}$	2 – 3 mm
α	5° – 8°	5° – 15°
R <sub>1</sub>	$(0,05 \text{ až } 0,1) \cdot d$	1 – 3 mm
D <sub>1</sub>	$d - (2 \cdot R_1 + 0,2) \approx 0,7 \cdot d$	

Zásadní vliv na velikost deformačního odporu má tvar dříku na kalibrační fasetu, který může mít stejný průměr jako faseta, nebo je pomocí kuželového přechodu jeho průměr zmenšen, což snižuje tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem, a tím klesá potřebný deformační odpor a následná tvářecí síla. Tření také ovlivňuje poloha průtlačníku 'h'. Vývoj je možno vidět v grafu na obrázku 34. Další způsob, jak ovlivnit deformační odpor, je změnou tvaru nosu průtlačníku, ten může být plochý, kuželový nebo sférický, viz obr. 35.

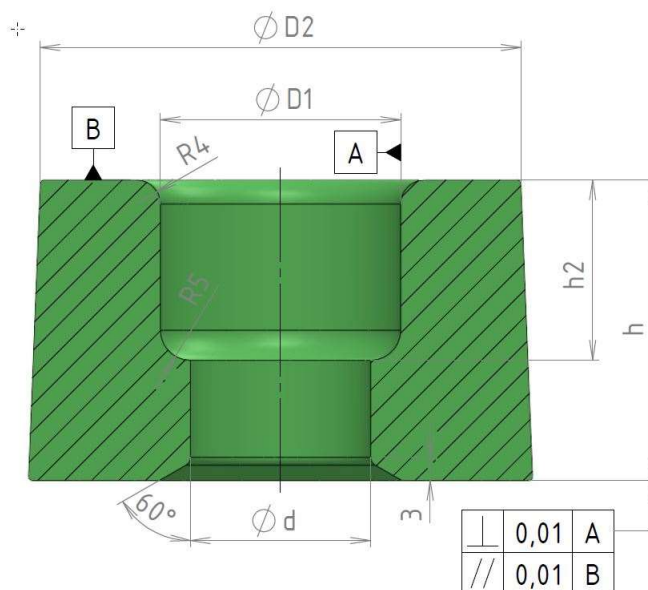


Obr. 35 Závislost deformačního odporu na tvaru průtlačníku [1]



Obr. 34 Závislost deformačního odporu na poloze průtlačníku [1]

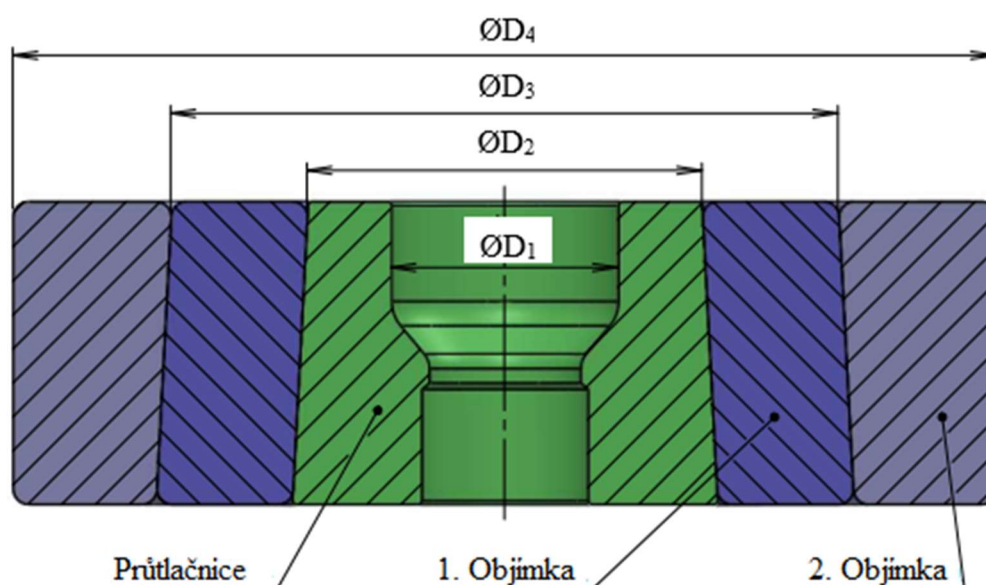
Dutina průtlačnice, která je v přímém kontaktu s tvářeným materiálem zaujímá vnější tvar tvářené součásti. Její povrch bývá broušen a lapován pro snížení tření a deformačního odporu, a také aby se zabránilo velkým osovým tahům, bývá funkční dutina otevřena s mírnou kuželovitostí, a to asi 1:1000. Pro kvalitní výrobky je také potřeba dodržet kolmosti a rovnoběžnosti čel a funkčních ploch průtlačnice. I zde se zaobluje, nebo sráží horní hrana pro snazší vkládání polotovaru do dutiny průtlačnice. Základní tvar a rozměry lze vidět na obrázku 36. Jednoduché průtlačnice mohou vydržet radiální tlaky až 1000 MPa, kde platí pravidlo pro tloušťku stěny průtlačnice  $D_2/D_1 = 2$ . Pro zvýšení únosnosti se dají použít objímky, obdobně jako u dopředného protlačování.



Obr. 36 Průtlačnice pro zpětné protlačování [1]

### 2.3.3 Armování průtlačnice [1], [5], [26],

Během protlačování za studena často dochází k vysokým radiálním napětím, které mohou mít za následek zničení nástroje. Jako opatření proti praskání a pro zvýšení únosnosti se používají tzv. objímky, které jsou nalisovány na průtlačnici. Díky tomu vzniká radiální předpětí, které vyrovnává tlak působící na vnitřní stěnu. Běžně se používá jedna, nebo dvě objímky. Jedna stačí pro výrobu menších součástí, kde nevznikají tak vysoké tlaky. Dvě se použijí u tlaků přesahujících 1 600 MPa. Tyto podmínky a rozměry jsou uvedeny v tabulce 8 a obrázku 37.



Obr. 37 Armovaná průtlačnice [1]

Tabulka 7 Parametry průtlačnic [1]

	Průtlačnice	
	jedna objímka	dvě objímky
<b>Radiální tlak [MPa]</b>	1 000 - 1 600	1 600 - 2 500
<b>Poměrné průměry</b>	$D_2/D_1 = 2 - 2,2$	$D_2/D_1 = 1,6 - 1,8$
	$D_3/D_1 = 2 - 2,3$	$D_3/D_1 = 2,2 - 3,2$
	$D_4/D_1 = 4 - 5,5$	$D_4/D_1 = 4 - 6$
<b>Přesah D<sub>2</sub> [mm]</b>	$(0,0055 - 0,0075) \cdot D_2$	$(0,004 - 0,005) \cdot D_2$
<b>Přesah D<sub>3</sub> [mm]</b>	-	$(0,003 - 0,004) \cdot D_3$

Využívají se dva způsoby, jak v soustavě vyvolat předpětí:

- Kuželová plocha – vnější plocha průtlačnice a vnitřní plocha objímky jsou obrobeny do kuželového tvaru tak, aby mezi nimi vznikl přesah a následně jsou do sebe zalisovány. Pokud jsou objímky dvě, nejprve se lisují do sebe, až potom se přidává průtlačnice. Výhodou je snazší použití a možnost jednotlivé objímky znovu využít. Nevýhodou se stává dražší výroba, jelikož kuželové plochy musí být velice přesné.
- Válcová plocha – obdobně jako u první metody jsou součásti vyrobeny s přesahem tak, aby vzniklo požadované předpětí. Vnější objímka je zde zahřáta na určitou teplotu, aby se roztáhla a následně je nalisována na průtlačnici. Za určitých podmínek je nutné vnitřní díl ochladit, aby se zmenšil jeho průměr.



## 2.4 Stroje [26], [27], [28], [29], [30], [31],

Volba správného tvářecího stroje závisí na druhu součástí, jaké se na něm budou vyrábět, jejich materiálu a v neposlední řadě na velikosti výrobní série. Vychází tedy ze síly, jaká je potřebná pro přetvoření materiálu a velikosti měrné práce, jaká je nutná pro vytvoření dané součásti.

Důležitou vlastností stroje je jeho tuhost, která je definovaná jako poměr zatížení a přetvoření v místě zátěže. Tuhost může ovlivnit jak přesnost výroby, účinnost či životnost nástrojů, tak i odpory proti smykovému tření. Poznatky z praxe ukazují, že životnost nástrojů na stroji se stojany ve tvaru C je zhruba poloviční, než u stojanů ve tvaru O.

Obecně se tvářecí stroje dělí podle druhu využití energie do tří skupin:

- **Hydraulické lisy** – jsou stroje, které používají zejména potenciální energii, aby překonaly deformační odpor tvářeného materiálu. Jedná se o tvářecí stroje silové, které mohou dosahovat rychlosti beranu okolo  $0,25 \text{ m.s}^{-1}$  a určují se tvářecí silou na beranu. Pohybu beranu je docíleno pomocí tlaku kapaliny (olej, nebo vodní emulze), která tlačí na píst beranu. Základními výhodami těchto lisů je možnost plynulé regulace rychlosti, docílení konstantního tlaku beranu a snadná automatizace provozu při použití pomocných operací. Velikost pracovního zdvihu je libovolně nastavitelná až na výšku celkového zdvihu. Tyto stroje jsou schopny vyvolat sílu až 1000 MN a nedají se přetížit. Mezi nevýhody patří složitější konstrukce pohonu, menší výrobnost a účinnost a vyšší pořizovací cena, která při stejné jmenovité síle může být vyšší až o 30 %. Hydraulický lis lze vidět na obrázku 38.
- **Mechanické lisy** – jedná se o tvářecí lisy zdvihové, které využívají jak potenciální, tak i kinetickou energii a jsou určeny jmenovitou silou stroje a dráhou, na které síla působí. Díky vysoké výrobnosti a poměrné jednoduchosti mechanismu jsou tyto stroje v praxi nejpoužívanější. Hlavní nevýhodou oproti hydraulickým lisům je, že maximální síly se dosahuje až na konci úvratě, tím pádem je síla během procesu nekonstantní a nedá se využít celkového zdvihu beranu. Také lis nesmí být zatížen silou větší, než je síla jmenovitá, jinak může dojít k přetížení stroje a následné poruše. Aby k nim nedocházelo, musí být stroje vybaveny různými pojistkami proti přetížení. Nejpoužívanějším mechanismem k uvedení beranu do pohybu je klikový mechanismus, kde se využívá pouze čtvrtiny otáčky klikové hřídele pro pracovní zdvih. Mechanický lis lze vidět na obrázku 39.

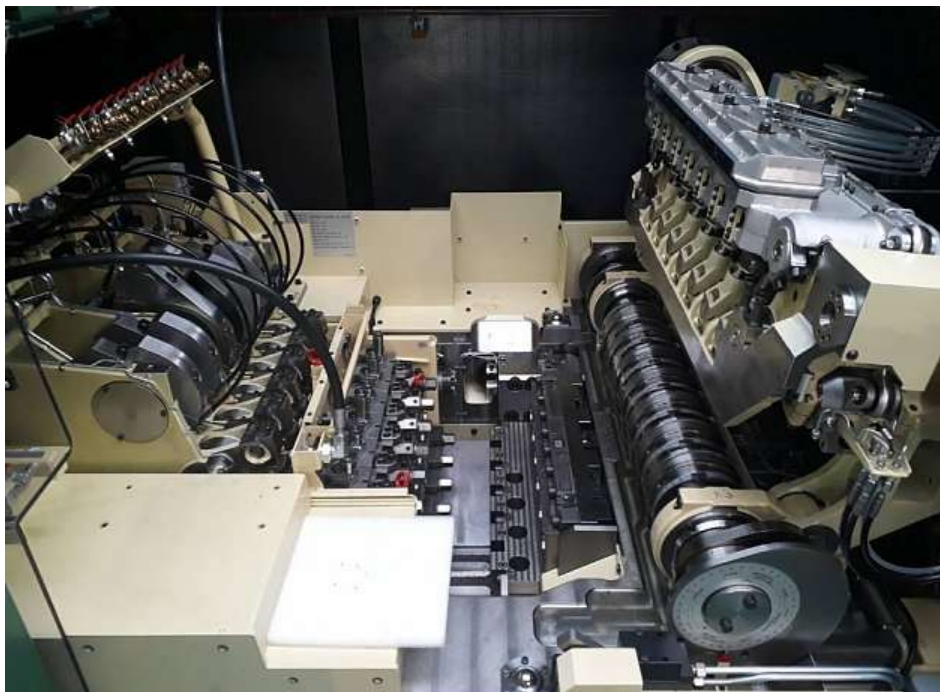


Obr. 38 Hydraulický lis [29]



Obr. 39 Klikový lis [30]

- Tvářecí automaty – jsou stroje určené zejména pro velkosériovou a hromadnou výrobu součástek, které se vyrábí na více než jednu operaci. Protlaček je zde tvářen postupně v sadě několika nástrojů, mezi kterými je přenášen pomocí zvláštního posuvného zařízení. Jako výchozí materiály se zde používají nejčastěji dráty a tyče, lze ale tvářet i z předem připravených špalíků. Pro zvolené polotovary je důležitá jejich jakost a povrchová úprava, aby nedocházelo k opotřebení nástroje, a tím k častým zastávkám výroby. Aby došlo k hospodárnému využití automatů, musí být splněno několik podmínek, jako je vysoký stupeň využitelnosti, vysoká produktivita za snížených nákladů, automatizace výroby či vysoká rentabilita. Tvářecí automat lze vidět na obrázku 40.



Obr. 40 Tvářecí automat [31]

## 2.5 Technologičnost [2], [5], [19], [38],

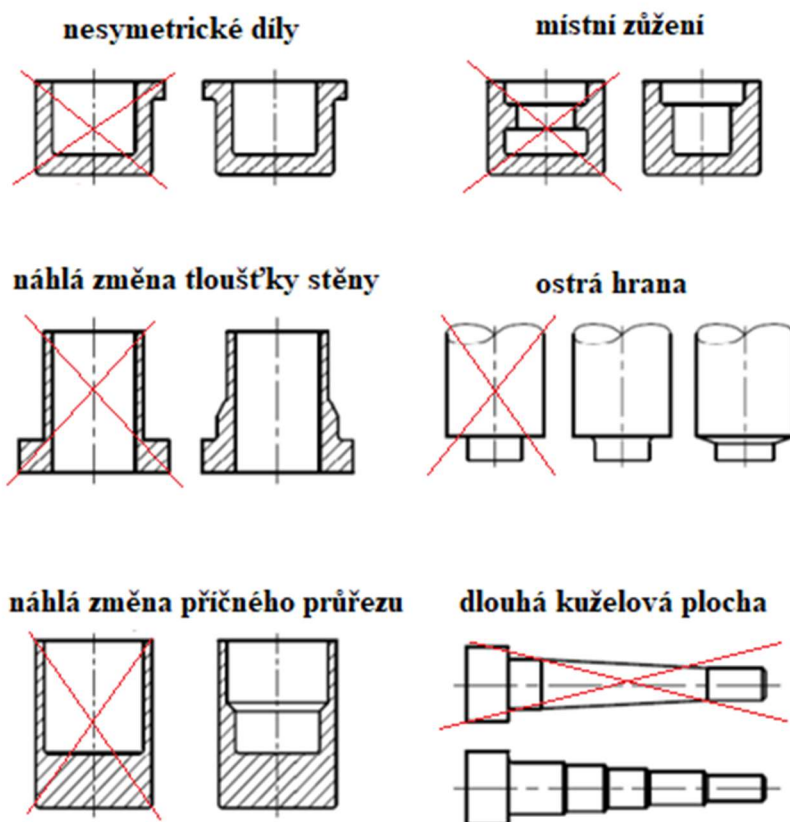
Technologičností je myšlena výroba součástí v nejkratším čase a s co nejmenšími náklady. Pro zvolení správné technologie rozhoduje spousta vlivů jako jsou tvar a rozměry, výrobní série, tolerance a jakost povrchu.

Nejběžněji se protlačováním vyrábí osově symetrické výlisky, které se dají rozdělit do dvou skupin podle tvaru. První skupinou jsou plné symetrické výtažky čepového typu, které mohou mít různě tvarovanou hlavu nebo odlišně tvarovaný dřík. Druhou skupinu tvoří duté symetrické nádoby, které mohou mít proměnné tloušťky stěn, nebo otvor ve dně, kdy je zapotřebí použití prstencového polotovaru. Dají se však vyrábět i nesymetrické výlisky. Velkým problémem mohou být náhlé změny příčných průřezů, ostré hrany a rohy, kam materiál nemusí zatéct. Proto, pokud je to možné, se na výrobek přidávají různé úkosey a zaoblení, které se lze později odstranit pomocí obrábění, zda to funkčnost součástky vyžaduje (obr. 41).

Rozměry výlisku jsou omezeny pouze silou stroje a měrným tlakem nástrojů, který u nástrojových ocelí dosahuje maximálně 2 500 MPa. Dají se protlačovat výrobky od nejmenších rozměrů, až k výliskům o délce 1500 mm a průměru 160 mm. U dutých protlačků nastává problém s tloušťkou stěny, která je závislá i na vzdálenosti, jakou musí materiál urazit. Běžně se dají vyrábět výlisky s tloušťkou stěny 1 mm. Dá se však dosáhnout i hodnot okolo 0,5 mm, v krajních případech i 0,1 mm.



Metodou protlačování se dá také dosáhnout přesnosti mezi (0,1 – 0,2) mm a kvalitního povrchu, jehož jakost se pohybuje někde mezi jemným broušením a lakováním.



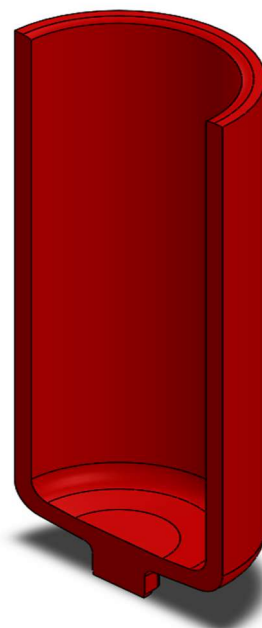
Obr. 41 Technologičnost tvarů [2]

### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ [2], [5],

Vyráběnou součástí je pouzdro tlakového filtru, ve kterém se pomocí papírové kartuše čistí olej, viz obr. 42. Jelikož na dílec bude působit pracovní tlak 100 barů, jsou na něj zákazníkem kladeny různé nároky na materiálové vlastnosti. Tvrdost materiálu musí být minimálně 145 HB a hodnota meze kluzu nesmí jít pod hranici 450 MPa. Z tvarového hlediska jde součást rozdělit na dvě části. První část je válcový tubus, kde je nutné dodržet tvarové tolerance válcovitosti a házení. Druhou část tvoří matice, která slouží k montáži pouzdra do filtrační soustavy. Zde bude docházet k velkým deformacím a je třeba zajistit, aby materiál nepraskal.

Bude se vyrábět z oceli C 15 (12 020), která je běžně používaná pro objemové tváření. Její mechanické vlastnosti společně se zvolenou technologií snadno dosáhnou zadaných podmínek. Velikost výrobní série je 8 000 kusů za rok.

Z pohledu technologičnosti by měla součást dodržet symetrický tvar bez ostrých hran či náhlých přechodů. Tomu součást vyhovuje, jelikož se jedná o symetrický díl ve tvaru kalíšku, který je typickým produktem zpětného protlačování. Problém by mohl nastat u matice, která je však řešena pomocí úkosů a zaoblení tak, aby se usnadnil tok materiálu a předešlo se vzniku trhlin.

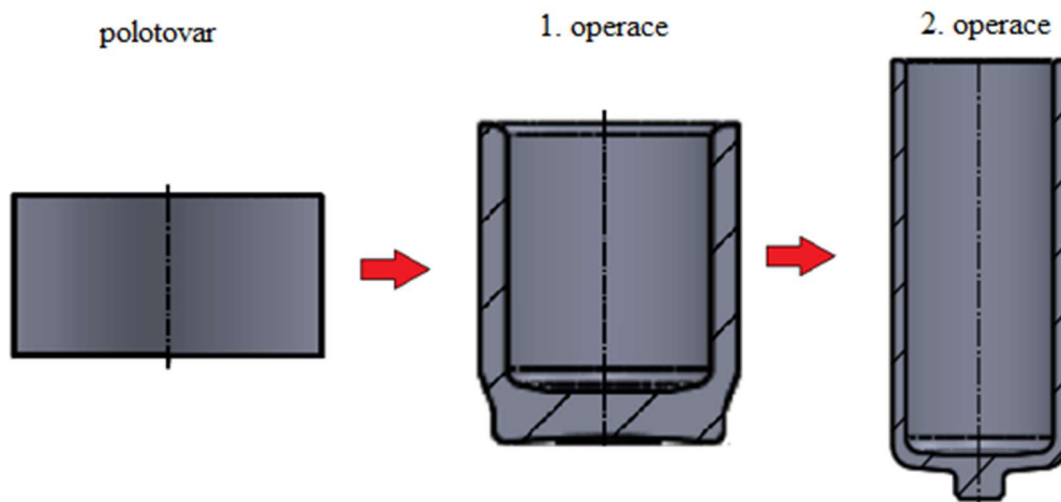


Obr. 42 Řešená součást [vl. tvorba]

#### 3.1 Varianty výroby

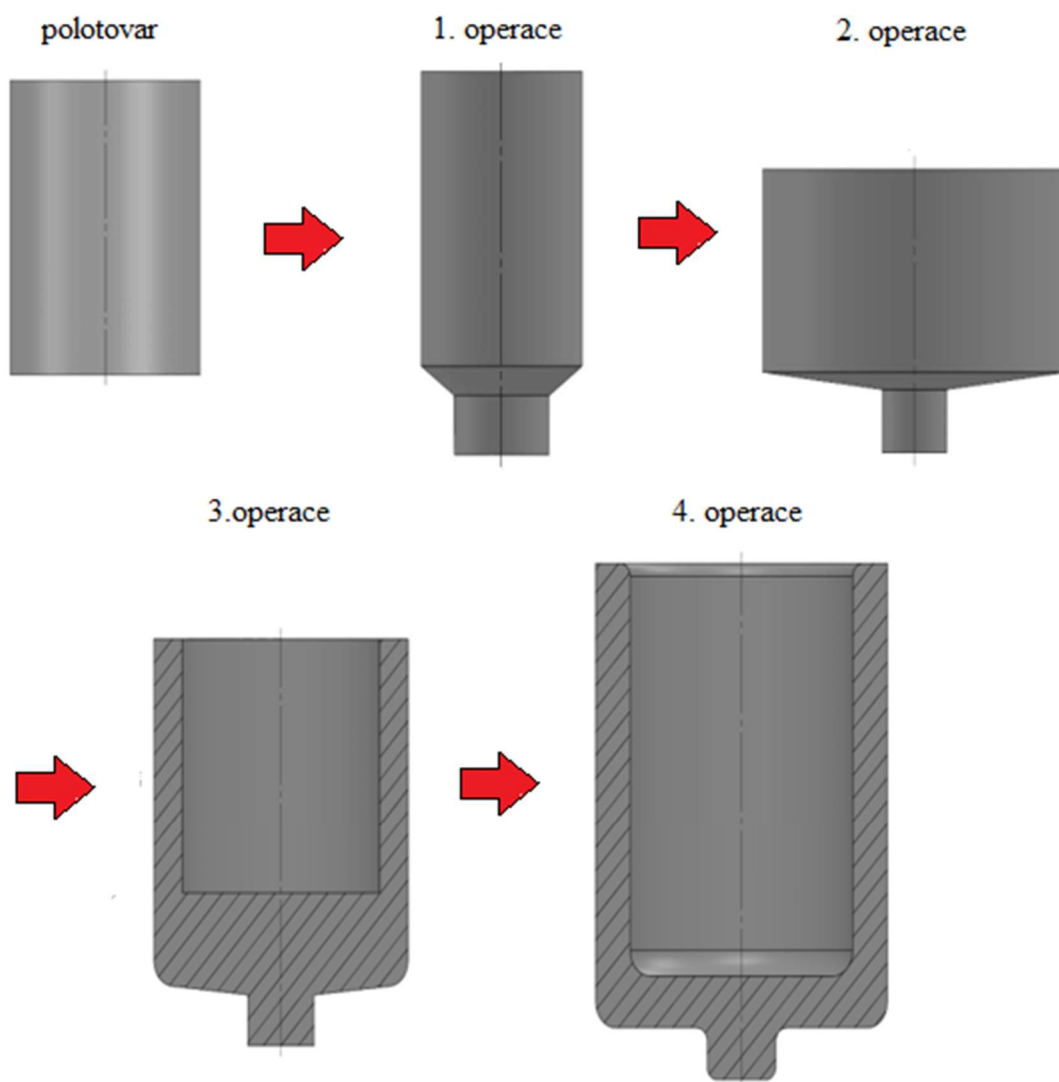
Při výrobě pouzder tlakových filtrů se ve firmě nejčastěji používají dvě varianty, proto bude rozhodováno právě mezi nimi na základě vyrobitelnosti a dosažení požadovaných nároku, ale také záleží na ekonomickém hledisku, kde nejvíce rozhoduje počet tvářecích operací. Jsou to varianty:

- Varianta 1 (obr. 43) – pouzdro zde bude tvářeno pomocí dvou operací, kde se uvažuje výroba pouzdra z přířezu ve tvaru kaloty. Polotovar bude muset nejdříve na linku povrchových úprav, kde dojde k fosfátování a následnému mýdlování. V první operaci bude při velkých hodnotách přetvoření vytlačen kalíšek, který bude muset být následně rekrystalizačně žíhán pro obnovení plasticity. Z toho důvodu se volí větší průměr, aby došlo ke zpevnění stěny pouzdra i při druhé operaci a dosáhlo se tak požadovaných materiálových vlastností. Před druhou operací bude také muset proběhnout fosfátování a mýdlování.



Obr. 43 Varianta 1 [vl. tvorba]

- Varianta 2 (obr 44) – druhá varianta uvažuje výrobu pouzdra na čtyři operace. Díky vyššímu počtu operací je tak zamezeno velkým přetvořením a deformačním odporům. Zmenšuje se přetvoření na šestihranu, který při montáži pouzdra může často praskat. Proces výroby je kombinací několika technologií. Při první operaci se pomocí dopředného protlačování předtvaruje šestihranu, následně v druhé operaci je polotovár spěchován na větší průměr. Při třetí operaci dochází k zpětnému protlačování válcové stěny pouzdra a nakonec, ve čtvrté operaci, dochází ke kalibraci celého tvaru protlačku.



Obr. 44 Varianta 2 [vl. tvorba]

Vzhledem k požadavkům zákazníka na ekonomický proces s co nejmenším počtem operací proběhla diskuse na téma zatěžování šestihranu. Bylo uvedeno, že matice bude využita jen při montáži pouzdra do filtru a potom pouze sporadicky. Z těchto důvodů by vyhovovala varianta jedna, kde však bude zapotřebí vysokých přetvárných sil. Jelikož firma disponuje stroji, které dokážou vyvolat jmenovitou sílu až 25 000 kN, není proto důvod, proč variantu jedna nezvolit.

### 3.2 Volba polotovaru

Při volbě polotovaru se bude postupovat reverzní metodou, bude se vycházet ze zadané součásti, ze které se dostanou rozměry pro první operaci a z ní následně rozměry polotovaru. Prvním krokem je zjištění objemu součásti, aby se následně mohl uplatnit zákon zachování objemu. Pro jeho spočítání se dá snadno použít CAD softwaru, v tomto případě SolidWorks 2019, který dává přesnou hodnotu:

$$V_s = 1\,038\,020,34 \text{ mm}^3$$

Hmotnost součásti je tedy potom:

$$m_s = V_s \cdot \rho = 1\,038\,020,34 \cdot 7850 \cdot 10^9 = 8,1485 \text{ kg} \quad (3.1)$$

kde:  $\rho$  – hustota oceli [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ], volí se  $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- z toho objem válcové části (3.2):

$$V_V = \left( \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \cdot h_{V2} = \left( \frac{\pi \cdot 119^2}{4} - \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \right) \cdot 271 = 885\,639,3 \text{ mm}^3$$

kde:  $h_{V2}$  – výška válcové části [mm]

- objem dna s maticí:

$$V_D = V_s - V_V = 1\,038\,020,34 - 885\,639,3 = 152\,381,04 \text{ mm}^3 \quad (3.3)$$

Vzhledem k tomu, že součásti takového typu jsou ve firmě pravidelně vyráběné, lze využít poznatků z předchozí praxe. Jelikož zde dochází k velkým přetvořením, je nutné, aby mezi operacemi proběhlo rekrytalizační žihání, které odstraní veškeré přetvoření a materiál se vrátí do původního stavu. Také je známo, že výsledná součást musí prokazovat dané materiálové vlastnosti, které jsou vyšší než u vybrané oceli C15. Proto je nutné, aby při druhé operaci došlo k přetvoření v celém objemu. Další předpoklad je, že matice se bude tvářet až v poslední operaci.

Je tedy nutné, aby po první operaci vznikl protlaček s větším vnějším průměrem a tlustší stěnou, než má dané pouzdro. S použitím zákona zachování hmotnosti je nutné zvolit kompromis mezi těmito rozměry a výškou výlisku. Zde se vychází z následujících parametrů:

- Velikost přetvoření se musí pohybovat okolo 0,3 - 0,4, aby nedošlo k porušení materiálu.
- Válcovitost a házení vnitřního průměru – čím je výška větší, tím horší bude tvar prstence.
- Objem dna kalíšku je zhruba dvojnásobek dna pouzdra s maticí:

$$V_{D_{1.op}} = 2 \cdot V_D = 304\,762,1 \text{ mm}^3 \quad (3.4)$$

- Potom objem válcové části kalíšku bude:

$$V_{V_{1.op}} = V_s - V_{D_{1.op}} = 1\,038\,020,34 - 304\,762,1 = 733\,258,3 \text{ mm}^3 \quad (3.5)$$

Snaha je dosáhnout co největšího možného přetvoření tak, aby se zajistily tvarové tolerance a v následné operaci nedocházelo k problémům s vedením průtlačníku. Vnitřní průměr je volen o 0,5 mm větší, právě kvůli jeho snazšímu vniknutí.

Závislost vnějšího průměru na přetvoření a na výšce válcové části je zaznamenána v tabulce 9.

Tabulka 8 Volba vnějšího průměru pro 1. op [mm]

Volba vnějšího průměru pro 1. op					
$d_1$	$D_{1\_1}$	$d_2$	$D_{2\_1}$	$\varphi$ [–]	$h$
100,5	126	100	119	-0,3279	161,64
100,5	127	100	119	-0,3708	154,86
100,5	128	100	119	-0,4122	148,58
100,5	129	100	119	-0,4523	142,74
100,5	130	100	119	-0,4911	137,30

Díky zkušenosti z praxe je vybrán vnější průměr 128 mm, jelikož je zde nejvhodnější poměr přetvoření a výšky protlačku. Další hodnoty se vypočítají následovně:

- skutečné přetvoření (2.3):

$$\varphi = \ln \left( \frac{D_{2,1}^2 - d_2^2}{D_{1,1}^2 - d_1^2} \right) = \ln \left( \frac{128^2 - 100,5^2}{119^2 - 100^2} \right) = -0,4122 [-]$$

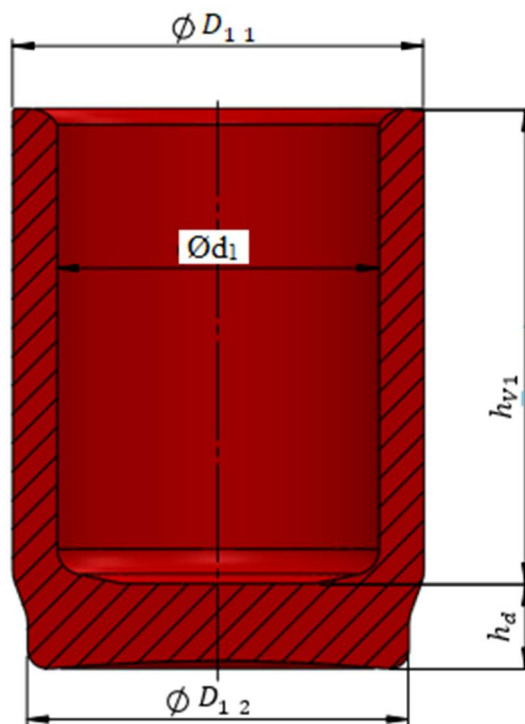
- výška válcové části po 1. operaci (2.2):

$$h_{v1} = \frac{V_{K_v}}{\frac{\pi \cdot D_{1,1}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} = \frac{733\,258,3}{\frac{\pi \cdot 128,3^2}{4} - \frac{\pi \cdot 100,5^2}{4}} = 148,58 \text{ mm}$$

Druhou část protlačku po první operaci tvoří dno. Zde je žádáno, aby se dosáhlo výsledného průměru již po první operaci  $D_{d1} = 119$  mm. Potom stačí přes zbylý objem vypočítat jeho výšku (2.2):

$$h_d = \frac{4 \cdot V_{D_{1,1.op}}}{\pi \cdot D_{1,2}^2} = \frac{4 \cdot 304\,762,1}{\pi \cdot 119^2} = 27,4 \text{ mm}$$

Vzhledem k různým poloměrům, zaoblením a vyboulením dna kalíšku při tváření se tyto rozměry ještě musí vyzkoušet v simulačním programu a případně je upravit tak, aby materiál tek l co nejlépe a nevznikaly žádné vady. Teoretický tvar a rozměry jsou zobrazeny na obrázku 45.



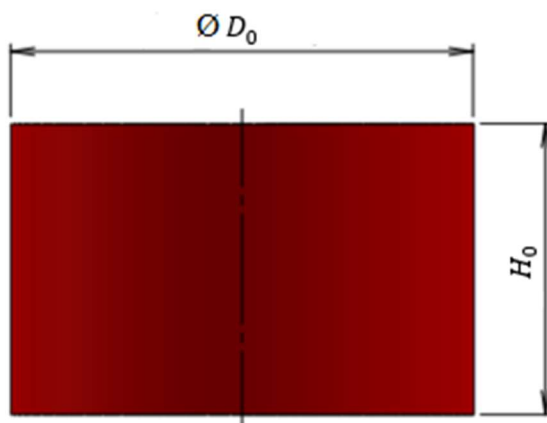
Obr. 45 Rozměry kalíšku po první operaci [vl. tvorba]

Potom je tedy průměr polotovaru volen  $D_0 = 128$  mm a výška se dopočítá ze zákona zachování objemu (2.2):

$$H_0 = \frac{4 \cdot V_s}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 1\,038\,020,34}{\pi \cdot 128^2} = 80,67 \text{ mm}$$

kde:  $H_0$  – výška polotovaru [ $\text{mm}^3$ ]

Vzhledem k možnosti většího přetoku je výška polotovaru volena  $H_0 = 81$  mm. Polotovar je tedy kalota o výšce 81 mm a průměru  $D_0 = 128$  mm (obr. 46).



Obr. 46 Rozměry polotovaru [vl. tvorba]

Jednotlivé kusy pro výrobu se budou získávat dělením válcovaných tyčí o normovaném průměru 128 mm dle ČSN 42 5510, které jsou dodávány ze závodu ve svazcích o délce 6 m (obr. 47) a jsou normalizačně žihány. Dále jsou nařezány na kotoučové pile na odpovídající rozměr a přesunuty na linku povrchových úprav (obr. 49).

Polotovary se zde pohybují v koších zhruba po sto kusech. Nejprve jsou odmaštěny pomocí alkalického roztoku, který rozpustí různé oleje a tuky. Po sérii oplachu následuje moření v kyselině sírové, která odstraní okuje, rez a další nečistoty. Očištěný materiál projde aktivací a následným fosfátováním, kde je ponořen do zinečnatého fosfátu. Nakonec je vzniklá pórovitá vrstva nasycena mýdlovým roztokem pro snížení tření v procesu. Takto nachystaný polotovar je připraven pro zpracování na stroji a je zobrazen na obrázku 50. Veškerý postup, délky operací a teploty procesu jsou zaznamenány v tabulce 10.

Nezbytnou součástí linky povrchových úprav je čistička vody, která je napojena na každou část procesu zvlášť, aby se například voda z oplachu po odmaštění čistila jinak než z moření. Po vyčištění je odváděna zpět do řeky.



Obr. 47 Tyčový polotovar [vl. tvorba]



Tabulka 9 Povrchová úprava pro ocel C15

Operace	Činnost	Teplota [°C]	Čas [min]
005	odmaštění	80	14
010	odmaštění	90	6
015	oplach 1	teplá voda	-
020	oplach 2	teplá voda	-
025	oplach 3	teplá voda	-
030	moření	60	6
035	oplach 1	teplá voda	-
040	oplach 2	teplá voda	-
045	oplach 3	teplá voda	-
050	aktivace	50	6
055	fosfátování	70	13
060	oplach 1	teplá voda	-
065	oplach 2	teplá voda	-
070	oplach 3	teplá voda	-
075	neutralizace	70	3,5
080	mýdlování	75	6,5
085	sušení	na vzduchu	8



Obr. 48 Připravený polotovár na první operaci [vl. tvorba]



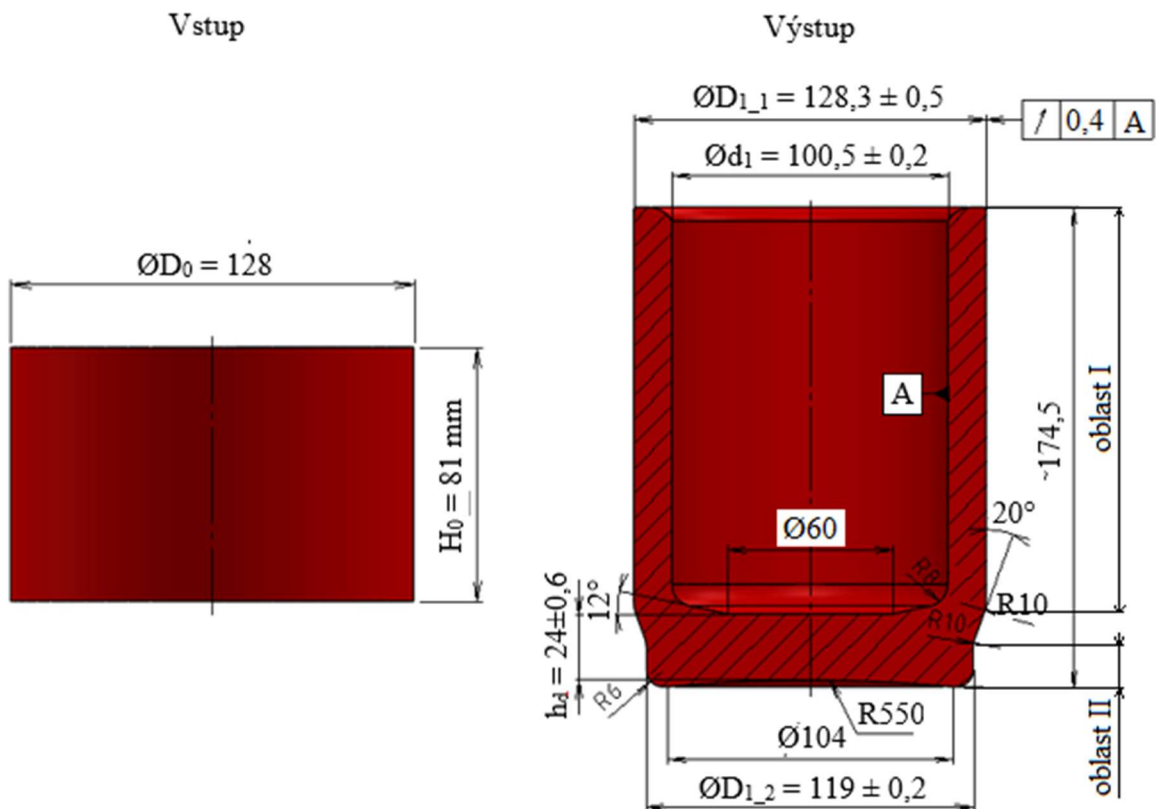
Obr. 49 Linka povrchových úprav [vl. tvorba]

### 3.3 Technologický postup a výpočty

Po schématickém návrhu výroby byly vytvořeny modely v softwaru SolidWorks 2019. Pomocí programu Deform 2D byla zjištěna proveditelnost operací a rozměry protlačků upraveny tak, aby materiál tekł co nejlépe a nedocházelo k nerovnostem a porušením. Díky tomu lze určit konečný postup výroby, který bude mít dvě operace.

### 3.3.1 První operace [5]

První operace je prováděna sruženým protlačováním a vychází z namydlované kaloty o průměru 128 mm. Z ní je tváren kalíšek o vnitřním průměru 100,5 mm s průměrem dna 119 mm. Důležitá je zde vůle pro vkládání polotovaru, která je 0,3 mm. Ze simulace v programu Deform 2D byly získány hodnoty přetvoření, deformace a síly. A dále se odhalila kritická místa, kde může výlisek praskat. Konečné změny protlačku po první operaci jsou zobrazeny na obrázku 50.



Obr. 50 Změna polotovaru po první operaci [vl. tvorba]

Pro výpočty k nastavení procesu se protlaček rozdělí na oblasti I a II:

Aby bylo možno definitivně rozhodnout, že je pouzdro tímto způsobem výrobitelné, je potřeba provést kontrolní výpočty přetvoření, které se porovnají s přípustnými hodnotami odvozených z praxe, které jsou v tabulce 4. Nejprve se výpočet rozdělí na dvě části:

- Oblast I – aby bylo možno definitivně rozhodnout, že je pouzdro tímto způsobem výrobitelné, je potřeba provést kontrolní výpočty přetvoření, které se porovnají s přípustnými hodnotami odvozených z praxe, které jsou v tabulce 11. Vypočítá se dle vzorce 2.22:

$$\varphi_{1-I} = \ln \left( \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_{1-1}^2} \right) = \ln \left( \frac{128^2}{128^2 - 100,5^2} \right) = 0,9583$$

Tabulka 10 Porovnání hodnot přetvoření pro první operaci – oblast I [5]

	Hraniční interval pro $\varphi$ [–]	reálné $\varphi$ [–]
<b>Oblast I</b>	0,5 až 1,5	0,9583

Hodnota přetvoření spadá do hraničního intervalu (tabulka 11). Lze tak prohlásit, že zde nedojde k porušení materiálu a také je nutné před další operací provést rekrystalizační žíhání, aby došlo k obnově plasticity.



Pomocí přetvoření se z grafu křivky zpevnění materiálu 12 020, který je v příloze 2, zjistí hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_{p_{1I}} = f(\varphi_{1I}) = 850 \text{ MPa.} \quad (3.6)$$

Dále se už jenom vypočítá deformční odpor, pro který byl zvolen výpočet dle Siebla (2.33):

$$\begin{aligned} \sigma_{d_{Siebel}} &= 1,152 \cdot \sigma_p \frac{S_{0,1}}{S_{1,1}} \left( \log \frac{S_{0,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} + \frac{S_{0,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} \cdot \log \frac{S_{0,1}}{S_{1,1}} + \log \frac{S_{0,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} \right) \\ &= 1,152 \cdot 850 \cdot \frac{12867,9}{7932,72} \left( \log \frac{12867,9}{12867,9 - 7932,72} + \frac{12867,9}{12867,9 - 7932,72} \cdot \log \frac{12867,9}{7932,72} + \log \frac{12867,9}{12867,9 - 7932,72} \right) = 2 \, 192,27 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{kde: } S_{0,1} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 128^2}{4} = 12 \, 867,96 \text{ mm}^2$$

$$S_{1,1} = \frac{\pi \cdot D_{1,1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 100,5^2}{4} = 7932,72 \text{ mm}^2$$

Nakonec se vypočítá potřebná protlačovací síla pro přetvoření této oblasti (2.35):

$$F_{p_{1I}} = \sigma_{d_{Siebel}} \cdot S_{1,1} = 2 \, 192,27 \cdot 7932,72 = 17 \, 390 \, 664 \text{ N}$$

Po zaokrouhlení se protlačovací síla volí 17 391 kN

- Oblast II – logaritmické přetvoření pro tuto oblast se vypočte dle vzorce pro dopředné protlačování (2.6):

$$\varphi_{1_{II}} = \ln \left( \frac{D_0^2}{D_{1,2}^2} \right) = \ln \left( \frac{128^2}{119^2} \right) = 0,0729$$

Tabulka 11 Porovnání hodnot přetvoření pro první operaci – oblast II

	Hraniční interval pro $\varphi$	reálné $\varphi$
<b>Oblast II</b>	0,35 až 3,0	0,0729

Hodnota přetvoření spadá do hraničního intervalu (tabulka 12) a je tedy možné prohlásit že zde nedojde k porušení materiálu.

Přirozený přetvárný odpor se opět získá z přílohy 2:

$$\sigma_{p_{1II}} = f(\varphi_{1_{II}}) = 550 \text{ MPa.}$$

Pro výpočet deformačního odporu pro oblast II byla využita metoda dle Feldmanna:

$$\begin{aligned} \sigma_{d_{Feld}} &= \sigma_{PS} \left[ \left( 1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left( \frac{D_{1,1}}{D_{1,2}} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{D_{1,2}L_3}{D_{1,1}^2} \sigma_{PS} + 4f_1 \frac{L_1}{D_{1,1}} \sigma_{P_{1B}} = \\ &= 500 \left[ \left( 1 + \frac{0,04}{0,3491} \right) \cdot \ln \left( \frac{128}{100,5} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,3491 \right] + \\ &+ 4 \cdot 0,04 \frac{119 \cdot 14}{128^2} \cdot 500 + 4 \cdot 0,04 \frac{81}{128} 550 = 212,79 \text{ MPa} \end{aligned}$$

kde:  $f_1$  a  $f_2$  jsou voleny 0,04

$$\alpha = 20^\circ = 0,3491 \text{ rad}$$

$$\sigma_{PS} = \frac{R_e + \sigma_{p_{1II}}}{2} = \frac{450 + 550}{2} = 500 \text{ MPa}$$

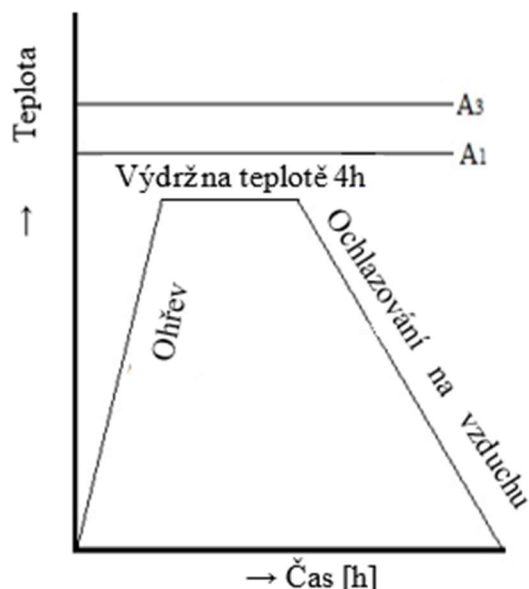
Výpočet protlačovací síly pro oblast II je potom:

$$F_{p_{1II}} = \sigma_{d_{Feld}} \cdot S_{1,1} = 212,79 \cdot 7932,72 = 1 \, 688 \, 003 \text{ N}$$

Protlačovací síla pro oblast II je zaokrouhlena a volena 1 688 kN.

### 3.3.2 Druhá operace [5]

Jak bylo zjištěno, před druhou operací je nutné průtlaček rekrystalizačně žíhat. K tomu se využívá linka na tepelné zpracování, která se taktéž nachází v areálu firmy. Jedná se o linku s průběžnou pecí, která je schopná materiál ohřát až na 1 000 °C. Obdobně jako u povrchových úprav jsou zde díly umístěny do kovových košů, které se pohybují na válcovém dopravníku. V peci se zahřejí na teplotu pod  $A_{c1}$ , tedy zhruba 500 až 700 °C. Výdrž na teplotě se pohybuje okolo čtyř hodin. Následně jsou koše vyndány ven z pece a chlazení probíhá na vzduchu (obr. 52). Na obrázku 51 lze vidět výpust' z pece, která je zároveň konečnou stanicí linky.



Obr. 52 Diagram rekrystalizačního žíhání [9]



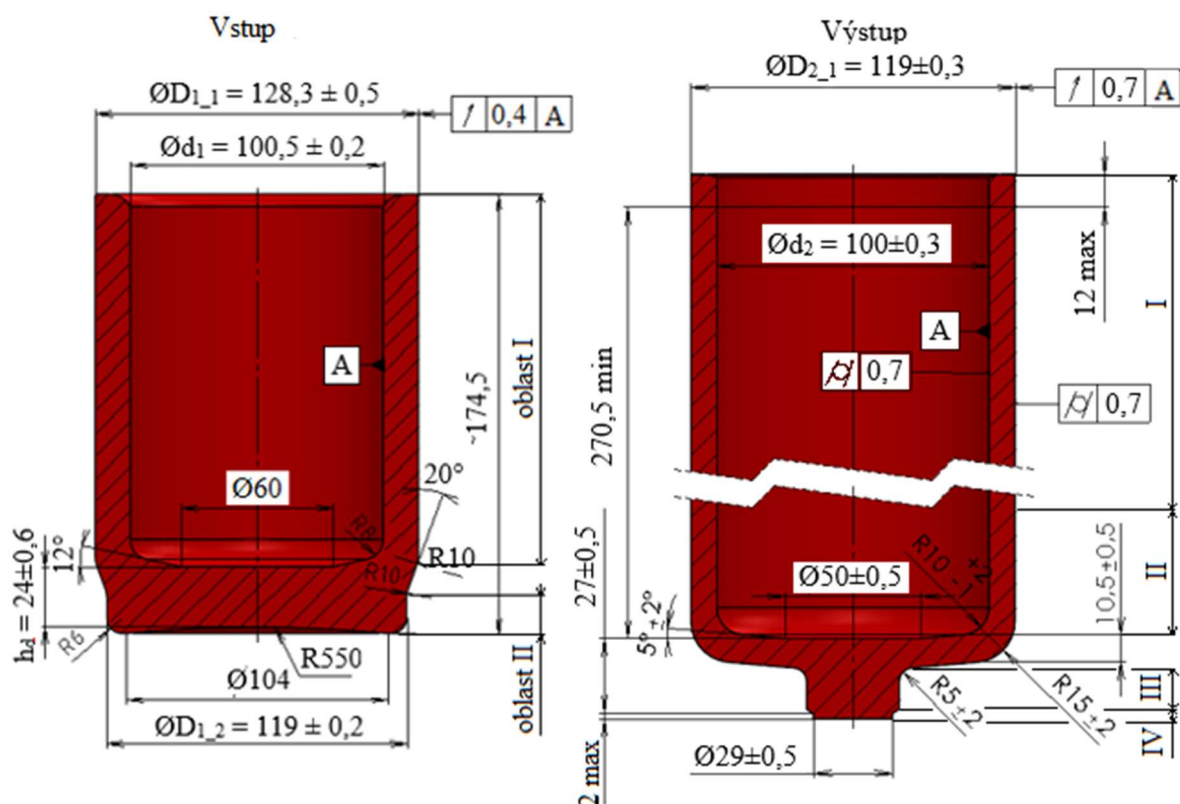
Obr. 51 Výpust pece [vl. tvorba]

Po vychladnutí jsou díly převezeny opět k lince povrchových úprav, kde podstupují obdobný proces jako tomu bylo před první operací. Výsledný kalíšek připravený pro druhou operaci je zobrazen na obrázku 53.



Obr. 53 Průtlaček po první operaci [vl. tvorba]

Při druhé operaci dojde k zmenšení vnějšího průměru válce ze 128 mm na 119 mm a ke kalibraci vnitřní válcové plochy na průměr 100 mm. Dále bude ze dna kalíšku vylisována šestihranná matice s rozměrem SW 30. Změna tvaru a rozměrů po druhé operaci je zobrazená na obrázku 54.



Obr. 54 Druhá operace [vl. tvorba]

Opět je nutno ověřit, zda se dá druhá operace provést, aniž by došlo k porušení pouzdra. Nejdříve se rozdělí na oblasti, kde probíhá stejný proces protlačování. Jak bylo zjištěno v první operaci, horní oblast duté válcové části vznikne ztenčením stěny kalíšku dopředným protlačováním (oblast I) a její zbytek se vytlačí z jeho dna zpětným protlačováním (oblast II). Šestihranná matice (oblast III) a její válcové zakončení (oblast IV) jsou vyrobeny dopředným protlačováním. Oblasti jsou zaznačeny v obrázku 51:

- Oblast I – logaritmické přetvoření se vypočítá dle vzorce (2.4):

$$\varphi_{2,I} = \ln \left( \frac{D_{2,1}^2 - d_2^2}{D_{1,1}^2 - d_1^2} \right) = \ln \left( \frac{119^2 - 100^2}{128,3^2 - 100,5^2} \right) = -0,4244$$

Hodnota přetvoření spadá do hraničního intervalu (tabulka 13). Lze tak prohlásit, že zde nedojde k porušení materiálu.

Tabulka 12 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast I [5]

	Hraniční interval pro $\varphi$ [–]	reálné $\varphi$ [–]
<b>Oblast I</b>	0,37 až 3,0	-0,4244

Pomocí přetvoření se z grafu křivky zpevnění, která je v příloze 2, zjistí hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_{p,2I} = f(\varphi_{2,I}) = 710 \text{ MPa.}$$

Dále se vypočítá deformační odpor, pro který byli zvolena metoda dle Feldmanna pro duté těleso (2.18):

$$\begin{aligned}\sigma_{d_{FeldI}} &= \sigma_{PS2} \varphi_{2,I} \left( 1 + \frac{1\hat{\alpha}}{2\varphi} + 2 \frac{f}{\hat{\alpha}} \right) + \pi D_1 L_1 \frac{f}{S_1} \sigma_{P1} = \\ &= 710 \cdot 0,4244 \left( 1 + \frac{0,2618}{2 \cdot 0,4244} + 2 \frac{0,04}{0,2618} \right) + \pi \cdot 128 \cdot 60 \frac{0,04}{12\,868} 450 \\ &= 431,04 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Nakonec se vypočítá protlačovací síla (2.21):

$$F_{P2,I} = \sigma_{d_{FeldI}} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 431,04 \cdot \frac{\pi \cdot 100^2}{4} = 3\,385\,380 \text{ N} = 3,39 \text{ kN}$$

- Oblast II – přetvoření se zde spočítá ze vzorce pro zpětné protlačování (2.22):

$$\varphi_{2,II} = \ln \left( \frac{D_{1,2}^2}{D_{1,2}^2 - d_2^2} \right) = \ln \left( \frac{119^2}{119^2 - 100^2} \right) = 1,2247$$

Z tabulky 14 je vidět, že hodnota přetvoření spadá do hraničního intervalu a nedojde tak v této oblasti k porušení protlačku.

Tabulka 13 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast II [5]

	Hraniční interval pro $\varphi$ [–]	reálné $\varphi$ [–]
<b>Oblast II</b>	0,51 až 1,4	1,2247

Hodnota přirozeného přetvárného odporu potom vychází:

$$\sigma_{p,2II} = f(\varphi_{2,II}) = 840 \text{ MPa} \quad (3.7)$$

Deformační odpor se vypočte dle Siebla (2.33):

$$\begin{aligned}\sigma_{d_{SiebellI}} &= 1,152 \cdot \sigma_P \frac{D_{21}^2}{d_2^2} \cdot \left( \log \left( \frac{D_{21}^2}{D_{21}^2 - d_2^2} \right) + \frac{D_{21}^2}{D_{21}^2 - d_2^2} \cdot \log \left( \frac{D_{21}^2}{d_2^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \log \left( \frac{D_{21}^2}{D_{21}^2 - d_2^2} \right) \right) = 1,152 \cdot 840 \cdot \frac{119^2}{100^2} \cdot \left( \log \left( \frac{119^2}{119^2 - 100^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{119^2}{119^2 - 100^2} \cdot \log \left( \frac{119^2}{100^2} \right) + \log \left( \frac{119^2}{119^2 - 100^2} \right) \right) = 2\,162,4 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Potřebná protlačovací síla k přetvoření této oblasti je rovna (2.35):

$$F_{P2,II} = \sigma_{d_{SiebellI}} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 2\,162,4 \cdot \frac{\pi \cdot 100^2}{4} = 16\,983\,450 \text{ N} = 16\,984 \text{ kN}$$

- Oblast III – logaritmické přetvoření se vypočte (2.3):

$$\varphi_{2,III} = \ln \left( \frac{S_{1,2}}{S_{SW}} \right) = \ln \left( \frac{\frac{\pi \cdot D_{1,2}^2}{4}}{\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a^2} \right) = \ln \left( \frac{\frac{\pi \cdot 119^2}{4}}{\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 17^2} \right) = 2,6955$$

kde:  $S_{SW}$  – plocha matice

Přetvoření zde dosahuje hraničních hodnot (tabulka 15) přípustného intervalu, proto je nutné provádět ve výrobě pravidelnou kontrolu a zamezit tak velké zmetkovitosti.

Tabulka 14 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast III [5]

	Hraniční interval pro $\varphi$ [–]	reálné $\varphi$ [–]
<b>Oblast III</b>	0,37 až 3,0	2,6955

Bohužel hodnoty přirozeného přetvárného odporu pro takové přetvoření již křivka zpevnění neukazuje. Tvářecí síla bude brána ze simulace.

- Oblast IV – logaritmické přetvoření v druhé operaci bude (2.3):

$$\varphi_{2_{IV}} = \varphi_{2_{III}} + \ln\left(\frac{S_{SW}}{S_{2_3}}\right) = \varphi_{2_{III}} + \ln\left(\frac{\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a^2}{\frac{\pi \cdot D_{2_3}^2}{4}}\right) = 2,6955 +$$

$$+ \ln\left(\frac{\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 17^2}{\frac{\pi \cdot 29^2}{4}}\right) = 2,6955 + 0,1282 = 2,8237$$

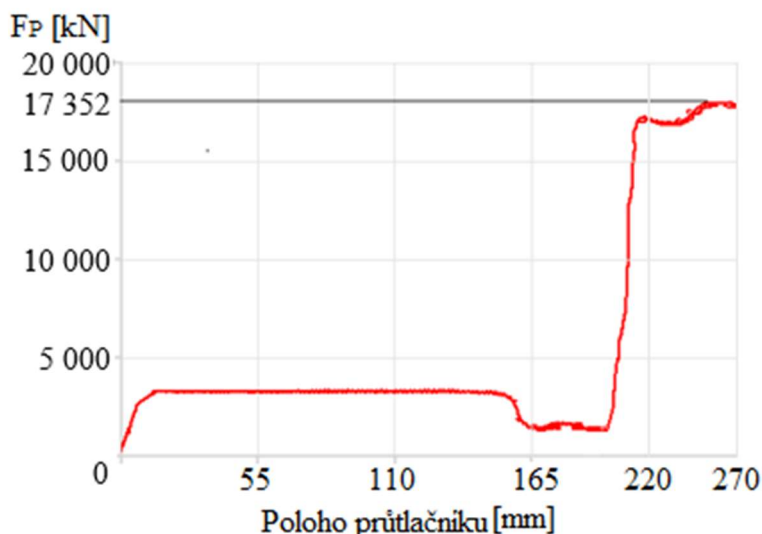
Z tabulky 16 je vidět, že přetvoření spadá do daného intervalu. Je však opět na hranici a bude nutné ve výrobě provádět častější kontroly.

Tabulka 15 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast IV [5]

	Hraniční interval pro $\varphi$ [–]	reálné $\varphi$ [–]
<b>Oblast IV</b>	0,37 až 3,0	2,8237

Hodnoty přetvoření jsou mimo graf z přílohy 2 a nedá se tak určit přirozený přetvárný odpor. Protlačovací síla bude určena ze simulace.

Jelikož pro oblast III a IV chybí data pro přirozený přetvárný odpor, pro získání protlačovací síly se využije simulace z programu Deform 2D. Z vygenerovaného grafu (obr. 55) je patrné, že největší síla nutná k přetvoření materiálu je 17 352 kN. Vzhledem k velikosti přetvoření jednotlivých oblastí se jedná o sílu k oblasti IV.



Obr. 55 Graf protlačovací síly pro druhou operaci [vl. tvorba]

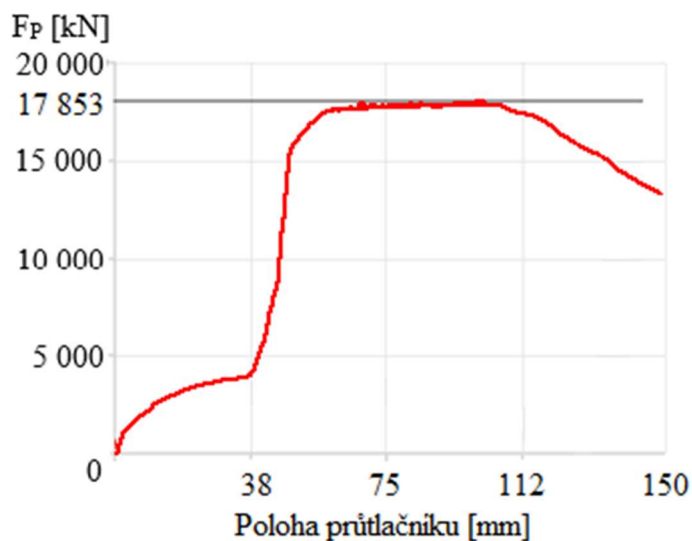
Pro ověření výsledků simulace se porovná protlačovací síla pro první operaci s výsledky ze softwaru Deform 2D, kde vyšla 17 853 kN (obr. 56):

$$F_{P1_I} < F_{P1_{simulace}} \quad (3.8)$$

$$17\,391\text{ kN} < 17\,853\text{ kN}$$



Z toho lze usuzovat, že simulace uvádí vyšší hodnoty protlačovací síly, a proto budou při volbě stroje uvažovány právě tyto hodnoty.

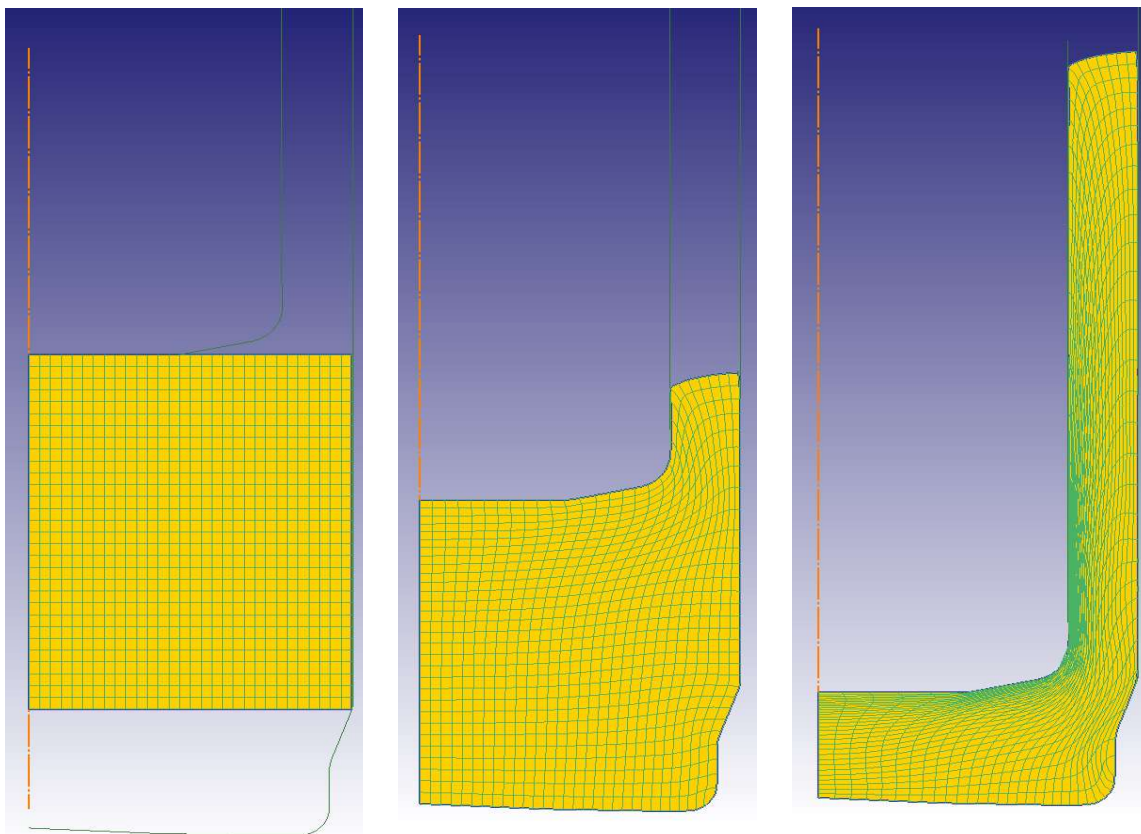


Obr. 56 Graf protlačovací síly pro první operaci [vl. tvorba]

### 3.3.3 Výsledky simulace

Pro ověření a kontrolu obou operací byl použit simulační program Deform 2D. K simulaci byly zapotřebí modely polotovaru, kalíšku po první operaci a výsledného pouzdra, které byly vytvořeny v programu SolidWorks 2019.

Program pomocí metody konečných prvků rozloží polotovaz na čtvercovou síť, jejíž rozměry je možné si navolit, podle toho, jak přesné hodnoty mají vyjít. Čím je síť hustější, tím jsou hodnoty přesnější.

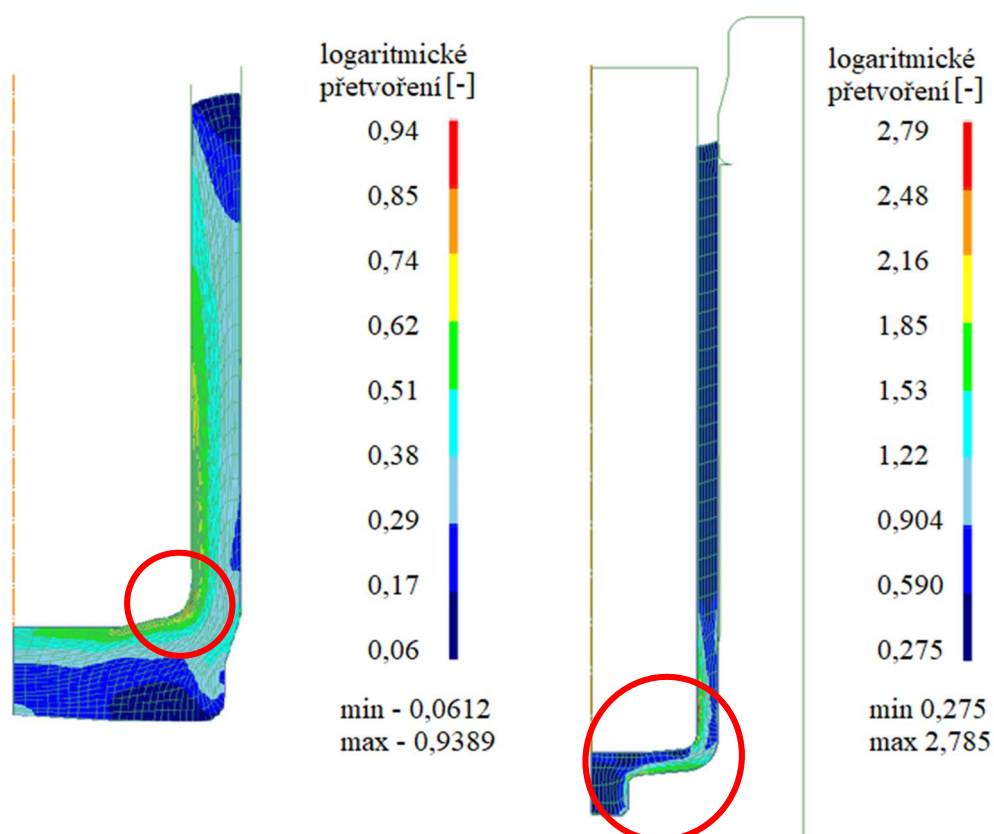


Obr. 57 Tok materiálu při první operaci [vl. tvorba]



Ze simulace se dá získat spousta výsledků. Ve firmě se používá především k zjištění pohybu materiálu při tváření, zda nedohází k nějakým vadám při tečení a zda je proces vůbec možno provést. Další důležitou funkcí programu je výpočet přetvárné síly, která je nezbytná pro nastavení výroby. Dále je možné získat hodnoty logaritmického i poměrného přetvoření či efektivního napětí.

Na obrázku 57 je vidět simulace pro první tvářecí operaci daného pouzdra tlakového filtru. Lze konstatovat, že nedochází k žádným chybám v tečení a při výrobě by neměl v tomhle směru nastat žádný problém.



Obr. 58 Logaritmické přetvoření z programu Deform 2D [vl. tvorba]

Jako další parametr pro kontrolu výpočtu bylo zvoleno logaritmické přetvoření. Jak lze vidět na obrázku 58, ze simulace pro první operaci je patrné, že nejvíce namáhané místo je v rohu kalíšku (vyznačeno na obr. 58). Podobně je také namáhána vnitřní část stěny dutého válce. Zde je potřeba směřovat pozornost při pravidelných kontrolách ve výrobě.

Z obrázku 58 lze také usuzovat, že nejvíce namáhané oblasti protlačeného dílu jsou opět roh dna a především šestihran. Zde dochází k hraničním hodnotám přetvoření, a proto je nutné provádět pravidelnou kontrolu i zde. Také lze vidět, jaká část válcové stěny je přetvořená ze stěny kalíšku (tmavě modrá oblast) a jaká ze dna (světle modrá oblast).

Tabulka 16 Porovnání vypočtených hodnot přetvoření se simulací

	Hodnoty maximálního logaritmického přetvoření [-]	
	Simulace	Výpočty
<b>1. operace</b>	0,9389	0,9583
<b>2. operace</b>	2,785	2,8237

Při porovnávání hodnot mezi simulací a vypočtenými hodnotami, které jsou zaznačené v tabulce 17, je patrné, že tyto hodnoty jsou si v celku podobné.

### 3.4 Návrh nástroje pro 1. operaci [1], [5], [26],

První navrhovaná část nástroje je průtlačnice, jejíž vnitřní tvar odpovídá vnějšímu tvaru součásti. Je namáhána vysokým smykovým a radiálním napětím, a proto se musí zajistit, aby za provozu nepraskla. K tomu slouží její tloušťka a objímky, které ji předepínají a vyrovnávají tak toto napětí.

Nejprve je nutné zjistit radiální napětí, které rozhoduje o množství objímek. K tomu je potřeba vnější průměr průtlačnice, který je volen dle firemních zkušeností z praxe a rovná se  $D_{P1} = 159$  mm. Radiální tlak se vypočítá jako (3.8):

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{r_1^2}{r_0^2} \right) = 2192,27 \cdot \frac{1}{1,24^2 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{79,5^2}{64^2} \right) = -2214,4 \text{ MPa}$$

$$\text{kde: } p_1 - \text{tlak na průtlačnici, } p_1 = \sigma_d = 2192,27 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

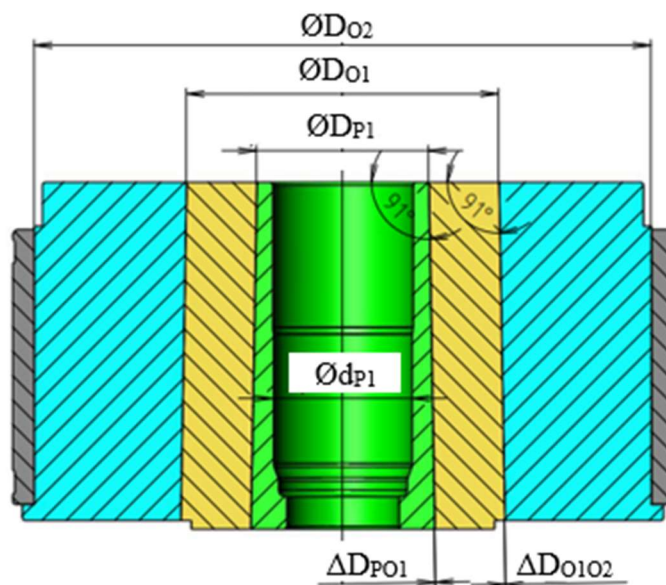
$$a - \text{koefficient poloměrů, } a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{79,5}{64} = 1,24 \quad (3.10)$$

kde:  $r_1$  – vnější poloměr průtlačnice

$r_0$  – vnitřní poloměr průtlačnice

Radiální tlak přesahuje hranici 1 600 MPa, a proto je nutné armovat průtlačnici dvěma objímkami, viz tabulka 8. Jejich rozměry jsou voleny dle praxe (obr. 59):

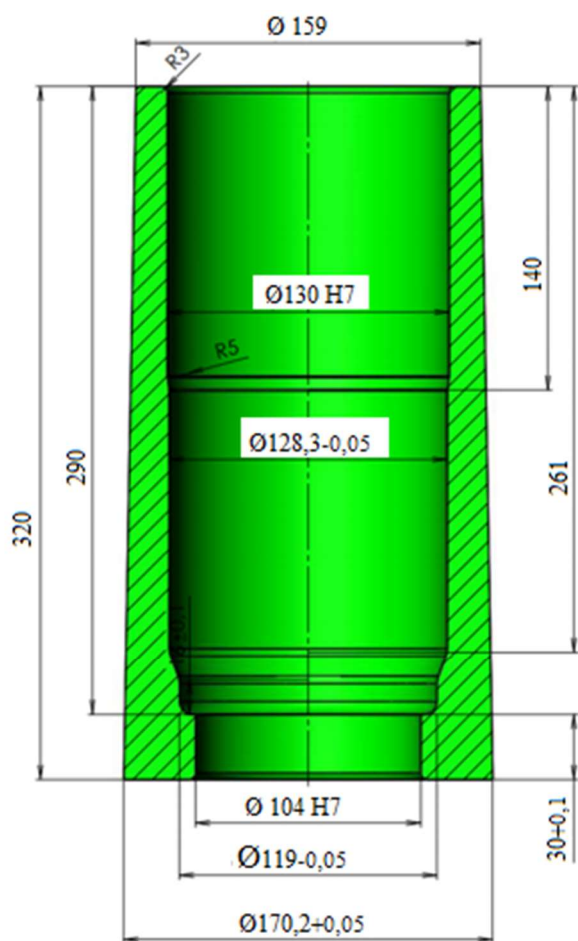
- $D_{O1} = 289$  mm
- $D_{O2} = 570$  mm
- $\Delta D_{PO1} = 0,12$  mm
- $\Delta D_{O1O2} = 0,36$  mm



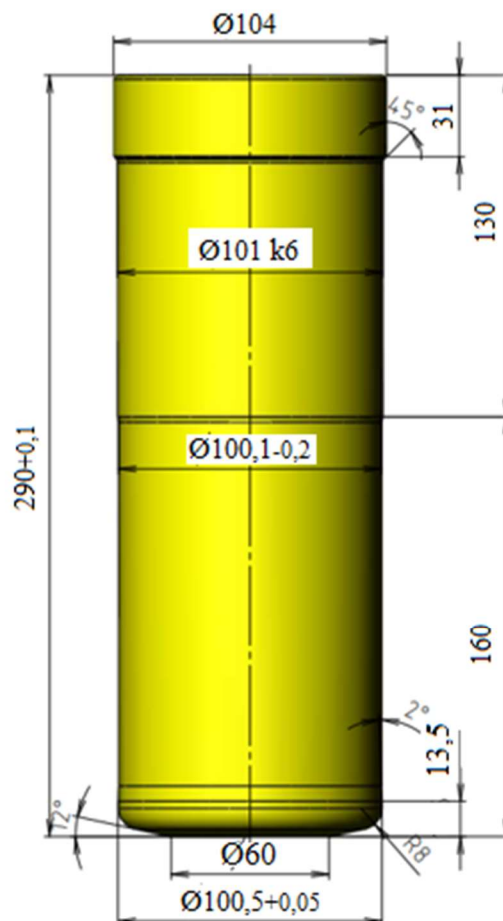
Obr. 59 Armovaná průtlačnice pro 1. operace [vl. tvorba]

Materiál použitý na výrobu průtlačnice je nástrojová ocel 19 655 zušlechtěná na 54-56 HRC. Její tvar tvoří negativ protlačovaného tvaru, který byl pomocí simulace upraven tak, aby tok materiálu byl co nejplynulejší a nedocházelo k žádným vadám jako jsou přeložky a rýhy.

Pro snadné vkládání polotovaru, byl její vnitřní průměr zvětšen o 0,3 mm na 128,3 mm s tolerancí -0,05 mm. Asi v polovině výšky se průměr rozšiřuje z důvodu snížení tření na 130 mm s tolerancí H7. Zkosení vnější hrany je 1°, což odpovídá hloubce zalisování asi 22 mm. Celá funkční část musí být leštěna diamantovou pastou. Průtlačnice je vidět na obrázku 60.



Obr. 60 Průtlačnice pro 1. operaci [vl. tvorba]



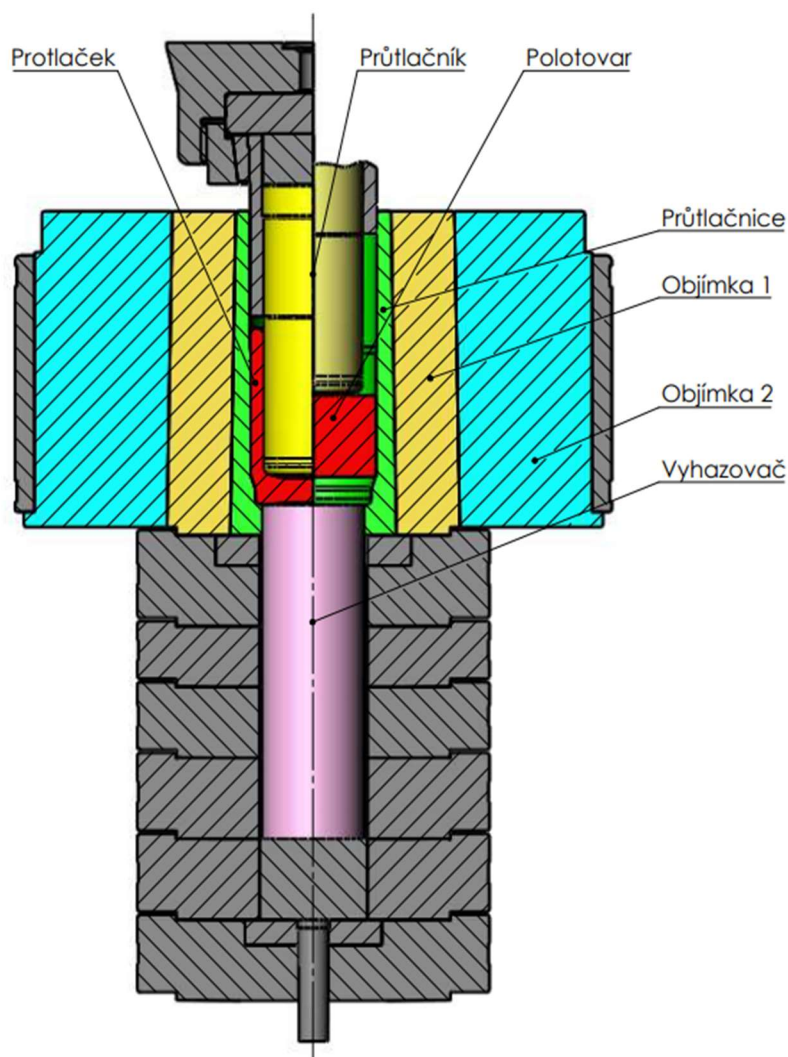
Obr. 61 Průtlačník pro 1. operaci [vl. tvorba]

Objímky použité pro armování průtlačnice jsou zhotoveny z oceli 19 554 a zpracovány na 44-46 HRC, viz obr. 59. Jejich tvar je upraven tak, aby se snáze skládaly do sestavy. Jsou vyrobeny do kuželovitěho tvaru se sklonem stěny 1° a spolu s průtlačnicí budou do sebe vlisovány, kdy se nejprve spojí první a druhá objímka, až poté je vlisována průtlačnice.

Průtlačník je vyroben z oceli 19 820, která je kalená a popuštěná na 60–62 HRC. Tvar jeho nosu tvoří komolý kužel o úhlu 12° s fazetou 2,7 mm o průměru 100,5 s tolerancí +0,05. Pro snížení tření byl volen průměr dříku o 0,4 mm menší než nosu. Pro zajištění dlouhé životnosti nástroje a kvalitního povrchu protlačku musí být funkční části leštěny a následně povlakovány. Využívá se metoda PVD, která probíhá za nízkých teplot, a tak neovlivní materiálové vlastnosti průtlačníku. Je zobrazen na obrázku 61.

Poslední funkční částí celého nástroje je vyhazovač, který je vyroben z oceli 19 820 zušlechťené na 60-62 HRC. Jeho tvar tvoří válec o průměru 104 mm a jedna z podstav zaujímá funkční plochu nástroje, kde tvoří dno kalíšku. Je nutné, aby plocha měla ostré hrany a kvalitní povrch. Důležité je také jeho uložení v průtlačnici, které musí zajistit na jedné straně snadný chod vyhazovače a na straně druhé mezi ně nesmí zatékat materiál. V tomto případě se jedná o uložení H7/h7.

Celý nástroj pro první operaci je zobrazen na obrázku 62.



Obr. 62 Nástrojová sestava pro 1. operaci [vl. tvorba]

### 3.5 Návrh nástroje pro 2. operaci [1], [5], [26],

Při druhé operaci dochází opět k sruženému protlačování, jelikož dutá válcová část vzniká jak ztenčením stěny kalíšku, tak vytlačněním určitého objemu materiálu ze dna. Vzhledem k technologii a délce součásti, by bylo zbytečné vyrábět takhle dlouhou průtlačnici. Po vzniku vady by se musela celá vyměnit, což by vedlo k vysokým cenovým nákladům za materiál a přípravu. Proto se při druhé operaci použijí dvě průtlačnice, z nichž jedna bude sloužit ke ztenčení stěny válce a druhá bude tvarovat dno pouzdra.

Při návrhu horní průtlačnice je nejprve nutné zjistit radiální tlak, který rozhoduje o množství objímek. K tomu je potřeba vnější průměr průtlačnice, který je volen na základě firemních zkušeností tak, aby bylo spotřebováno co nejméně materiálu a zároveň díl vydržel působící tlaky -  $D_{(P2)1} = 168 \text{ mm}$ :

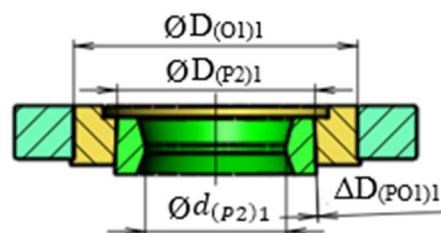
$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2}\right) = 431,04 \cdot \frac{1}{1,41^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{95^2}{59,5^2}\right) = -675,8 \text{ MPa}$$

$$\text{kde: } p_1 = \sigma_{d_{SiebelB}} = 431,04 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{84}{59,5} = 1,41$$

Pro takový tlak, dle teoretických tabulek, není armování průtlačnice zapotřebí. Vzhledem k tomu, že se nástroj skládá z více funkčních částí a díky poznatkům z praxe byla pro vrchní průtlačnici zkonstruována jedna objímka a výsledné rozměry jsou potom voleny (obr. 63):

- $D_{(O1)1} = 240 \text{ mm}$
- $\Delta D_{(PO1)1} = 0,22 \text{ mm}$



Obr. 63 Horní armovaná průtlačnice

Obdobně se postupuje i u návrhu armování u spodní průtlačnice. Opět je zvolen její vnější průměr, který je v tomto případě  $D_{(P2)2} = 165 \text{ mm}$

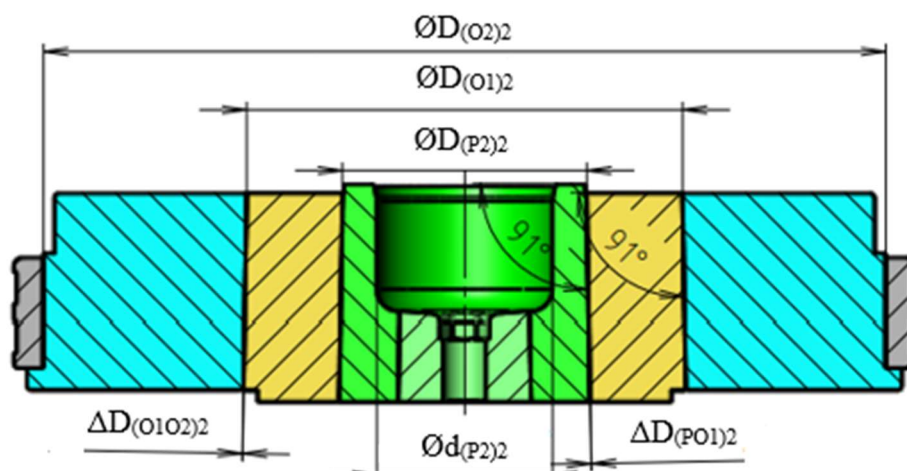
$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2}\right) = 2\,162,4 \cdot \frac{1}{1,39^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{82,5^2}{59,5^2}\right) = -2\,140,21 \text{ MPa}$$

$$\text{kde: } p_1 = \sigma_{d_{FeldA}} = 2\,162,4 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{82,5}{59,5} = 1,39$$

Vzhledem k firemním zkušenostem a úspoře materiálu jsou rozměry objímek voleny (obr. 64):

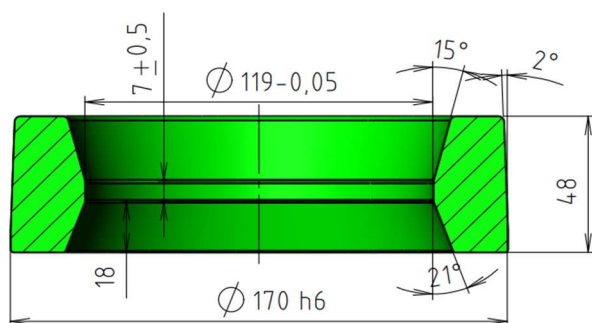
- $D_{(P2)2} = 165 \text{ mm}$
- $D_{(O1)2} = 295 \text{ mm}$
- $D_{(O2)2} = 570 \text{ mm}$
- $\Delta D_{(PO1)2} = 0,3 \text{ mm}$
- $\Delta D_{(O1O2)2} = 0,45 \text{ mm}$



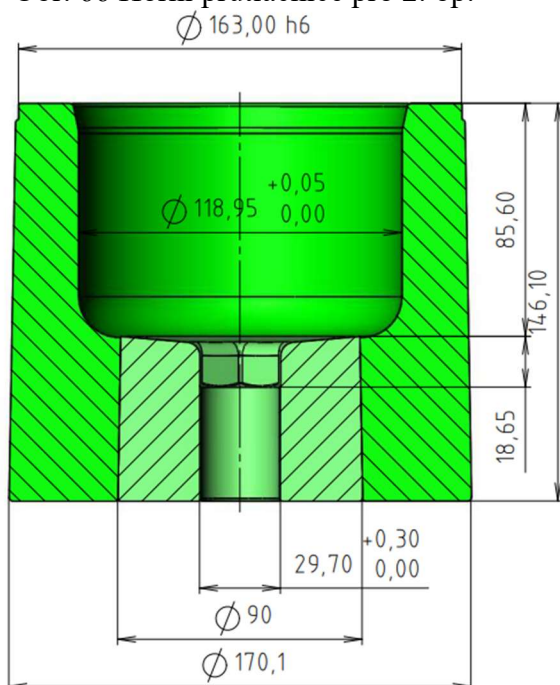
Obr. 64 Spodní armovaná průtlačnice pro 2. op [vl. tvorba]



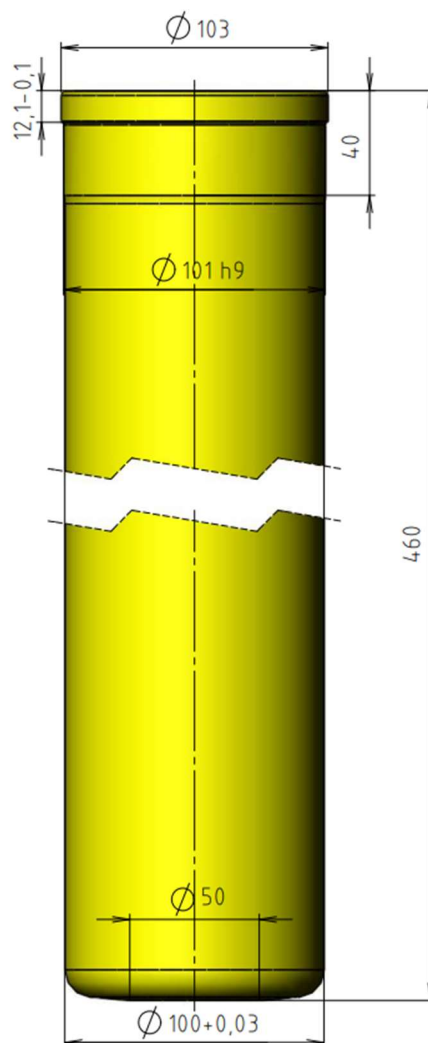
Obě průtlačnice jsou vyrobeny z nástrojové oceli 19 655, která je kalena a popuštěna na 54 - 56 HRC a všechny funkční části musejí být leštěny. Horní průtlačnice má tvar prstence s výškou kalibračního oka 7 mm, viz obr. 66. Výška jejího zalisování do objímky je zhruba 7 mm. Spodní průtlačnice podléhá vysokým tlakům, proto byla navržena jako dělená. Díky tomu bude možné při poškození vyměnit pouze vložku, která tvaruje matici a ušetřit tak za materiál. Výška zalisování do objímky je zhruba 18 mm. Je zobrazena na obrázku 65.



Obr. 66 Horní průtlačnice pro 2. op.



Obr. 65 Spodní průtlačnice pro 2. op.



Obr. 67 Průtlačník pro 2. op.

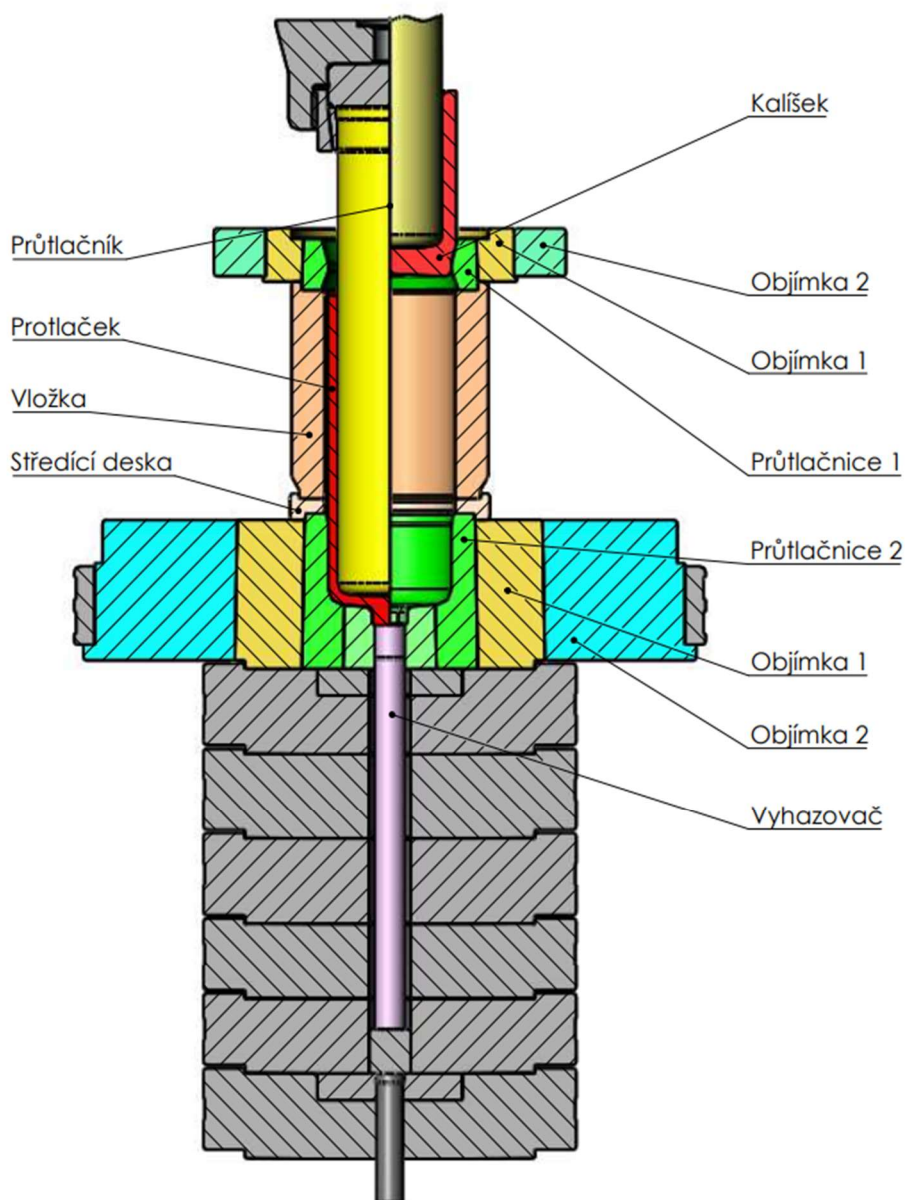
Prostor mezi oběma průtlačnicemi vyplňuje distanční vložka, která je uložena ve středící desce. Vložka je navržena tak, aby se hotové pouzdro vlezlo mezi obě průtlačnice. Kvůli snížení tření je průměr vyroben tak, aby se při procesu vložka s protlačkem nedotýkaly. Uvažovalo se mezi dvěma variantami – první byla vložka ve tvaru písmene U, která umožňuje snadnější odebrání hotového pouzdra z nástroje. Vzhledem k možnostem stroje a velikosti tvářecích sil byla nakonec zvolena druhá varianta – válcovitá vložka.

Průtlačník je vyroben z nástrojové oceli 19 820, která je kalená a popuštěná na 60–62 HRC. Stejně jako u první operace, je nutné i zde průtlačník povlakovat metodou PVD. Konec dríku kopíruje tvar dna vyráběného pouzdra. Hlava je navržena jednoduše pro snadné uchycení do nástrojové sestavy. Jeho základní rozměry jsou vidět na obrázku 67.



Poslední částí nástroje, která se aktivně podílí na procesu tváření je vyhazovač. Materiál, ze kterého je vyroben, je ocel 19 820 kalená a popuštěná na 60-62 HRC. Je nutné, aby jeho funkční plocha měla ostrou hranu a kvalitní povrch. Důležité je také jeho uložení v průtlačnici, které musí zajistit na jedné straně snadný chod vyhazovače a na straně druhé mezi ně nesmí ztékat materiál. V tomto případě se jedná o uložení H7/h7.

Celý nástroj pro druhou operaci je zobrazen na obrázku 68.



Obr. 68 Nástrojová sestava pro 2. operaci [vl. tvorba]

### 3.6 Volba stroje

Pro výrobu pouzdra je také důležité zvolit stroj, který odpovídá kladeným nárokům a je schopný součást kvalitně vyrobit. Při jeho volbě se musí zhodnotit hned několik parametrů, jakými je tvářecí síla, počet operací (pracovních pozic), velikost zdvihu či rozměry pracovní plochy.

Jelikož se součást zhotovuje na dvě operace a musí se provádět mezioperační žíhání, stačí zvolit jedno-operační lis. Ten je vhodnou volbou i z hlediska velikosti tvářecích sil, protože tvářecí automaty nejsou schopny vyvinout takové síly. Nutné protlačovací síly pro jednotlivé operace byly brány ze simulačního programu, protože zde vyšli vyšší hodnoty:

- Průtlačná síla pro první operaci  $F_{P1} = 17\,352\text{ kN}$
- Průtlačná síla pro druhou operaci  $F_{P2} = 17\,853\text{ kN}$

Jak lze vidět, obě hodnoty jsou si velmi podobné, a proto se pro obě operace zvolil stejný stroj od firmy EITEL KG KARLSRUHE, který má jmenovitou tvářecí sílu 25 000 kN a svým pracovním prostorem vyhovuje zkonstruovaným nástrojům. Jedná se o největší a nejsilnější stroj v arсенálu firmy Metaldyne Oslavany. Je vidět na obrázku 69 a jeho parametry jsou zaznamenány v tabulce 18.

Tabulka 17 Parametry stroje

Výrobce	EITEL KG KARLSRUHE
Jmenovitá síla	25 00 kN
Zdvih beranu	800 mm
Rychlost beranu	1,8 m/min
Příkon stroje	500 kW
Plocha stolu	1 000 x 1 200 mm
Plocha beranu	1 000 x 1 200 mm
Délka stroje	2 050 mm
Šířka stroje	3 500 mm
Výška stroje nad podlahou	7 500 mm
Hmotnost stroje	225 000 kg



Obr. 69 stroj EITEL KG KARLSRUHE  
[vl. tvorba]

#### 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [5], [32], [33]

Při posuzování technicko-ekonomické stránky výroby je potřeba si uvědomit výhody a nevýhody zvolené technologie. Při výrobě pouzdra objemovým tvářením za studena se využije 100 % materiálu. Není tedy zapotřebí žádné složité odpadové hospodářství, jako je tomu například u třískového obrábění. Další výhodou je zvýšení mechanických vlastností materiálu, díky čemuž se dá použít levnější materiál. Nespornou předností jsou také kratší výrobní časy a vysoká produktivita výroby. Na druhou stranu je zapotřebí velkých investic při pořizování tvářecích strojů, které oproti moderním obráběcím centrům mají až několikanásobné ceny. Vysoké náklady jsou zapotřebí také na nákup a výrobu specifických tvářecích nástrojů, které však nepodléhají tak velkým opotřebením jako je tomu u nožů, vrtáků a fréz pro obrábění.

Vzhledem k těmto poznatkům je rozhodujícím prvkem, zda dojde k ekonomickému zisku či ztrátě, sériovost výroby. Je tedy nutné zjistit kolik je potřeba vyrobit kusů za zvolené období, aby měla výroba pro firmu pozitivní ekonomický dopad. Tomuto konkrétnímu číslu se říká bod zlomu a určuje okamžik, kdy se výroba součásti stává ziskovou. Náklady na výrobu se dají rozdělit do několika skupin, viz tabulka 19.

Tabulka 18 Náklady na výrobu [32]

Přímé náklady na materiál	Vlastní náklady výroby	Vlastní náklady výkonu	Úplné vlastní náklady výkonu	Výrobní cena	Prodejní cena
Přímé náklady na mzdy					
Ostatní přímé náklady					
Výrobní režie					
Správní režie					
Odbytové náklady					
Zisk					
Odbytové a obchodní přírážky a srážky					

Do výpočtu nebyly brány v potaz některé reálné náklady jako je například režie, která zahrnuje amortizaci strojů, řízení a správa podniku, náklady na údržbu a úklid areálu a také provozní náklady jako je osvětlení, vytápění či elektřina. Obchodní přírážka byla stanovena na 50 %, výsledek bude pouze orientační.

Nejprve je nutné spočítat přímé náklady:

- A) Přímé náklady na materiál – pomocí výpočtu byl zvolen polotovár jako kalota o průměru 128 mm a výšce 81 mm. Bude se řezat z nakoupených válcovaných tyčí Lo stejném průměru s délkou 6 000 mm pomocí kotoučové pily. Pro upnutí tyče do pily je nutných 80 mm a řezný kotouč má šířku 2 mm.

- hmotnost jedné tyče:

$$m_t = \rho \cdot V_t = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot 10^9} \cdot L_t = 7\,850 \cdot \frac{\pi \cdot 128^2}{4 \cdot 10^9} \cdot 6\,000 = 606,08 \text{ kg} \quad (4.1)$$

kde:  $V_t$  – objem tyče [ $\text{m}^3$ ]

$D_0$  – průměr tyče [mm]

$L_t$  – délka tyče [mm]

- cena jedné tyče – firma nakupuje tyčový polotovár Ø128x6000 z materiálu 1.1141 za cenu 610€ za tunu. Při dnešním kurzu odpovídá cena jedné tyče  $C_t = 9\,413 \text{ Kč}$ .

- počet přířezů z jedné tyče:

$$n_p = \frac{L_t - L_{NK}}{H_0 + s_k} = \frac{6\,000 - 80}{81 + 2} = 71,32 \text{ ks} \quad (4.2)$$

kde:  $L_{NK}$  – nevyužitý konec tyče [mm]

$H_0$  – výška přířezu [mm]

Z tyče se dá získat 71 kusů přířezů.

- počet tyčí pro výrobu zadané série:

$$n_t = \frac{n_r}{n_p} = \frac{8\,000}{71} = 112,67 \text{ ks} \quad (4.3)$$

kde:  $n_r$  – velikost výrobní série za rok [ks]

K výrobě zadané výrobní série je potřeba 113 ks tyčového polotovaru.

- hmotnost celkového počtu tyčového polotovaru pro výrobní sérii:

$$m_{ts} = n_t \cdot m_t = 113 \cdot 606,08 = 68\,487,04 \text{ kg} \quad (4.4)$$

- cena materiálu na jeden kus výrobku:

$$C_{ks} = \frac{C_t}{n_p} = \frac{9\,413}{71} = 132,6 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

Přímé náklady na materiál pro celou roční sérii jsou potom:

$$PN_{mat} = C_{ks} \cdot n_r = 83,3 \cdot 8\,000 = 666\,400 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

kde:  $PN_{mat}$  – přímé náklady na materiál [Kč]

#### B) Návratnost z nevyužitého materiálu:

- Hmotnost nevyužitého materiálu:

$$m_{odpad} = m_{ts} - (m_s \cdot n_r) = 68\,487,04 - (8,1485 \cdot 8\,000) = 3\,299 \text{ kg} \quad (4.7)$$

- Cena vráceného odpadu:

$$C_{odpad} = m_{odpad} \cdot C_{kg} = 3\,299 \cdot 3 = 9\,897 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

kde:  $C_{Fe}$  – Cena za železný šrot [Kč/kg],  $C_{Fe} = 3 \text{ Kč}$

#### C) Náklady na povrchové úpravy:

- počet košů na povrchovou úpravu

$$n_{koš} = \frac{m_{P2}}{k} = \frac{65\,188}{900} = 72,43 \text{ ks} \quad (4.9)$$

kde:  $k$  – nosnost jednoho koše [kg],  $k = 900 \text{ kg}$

Pro povrchovou úpravu je potřeba 73 košů.

- náklady na povrchovou úpravu celé série:

$$N_{PU1} = N_{koš} \cdot n_{koš} = 1\,040 \cdot 73 = 75\,920 \text{ Kč} \quad (4.10)$$

kde:  $N_{koš}$  – Náklady na povrchovou úpravu [Kč],  $N_{koš} = 1\,040 \text{ Kč}$

Jelikož se bude povrchová úprava provádět jak před první, tak i před druhou operací, je nutné náklady na povrchovou úpravu započítat dvakrát:

$$N_{PU} = 2 \cdot N_{PU1} = 2 \cdot 75\,920 = 151\,840 \text{ Kč} \quad (4.11)$$

#### D) Náklady na rekrystalizační žíhání:

- celková hmotnost polotovarů po druhé operaci:

$$m_{P2} = m_s \cdot n_r = 8,1485 \cdot 8\,000 = 65\,188 \text{ kg} \quad (4.12)$$

- počet hodin v průběžné peci:

$$t_{pec} = \frac{m_{P2}}{P_{pec}} = \frac{65\,188}{1\,750} = 37,3 \text{ hod} \quad (4.13)$$

kde:  $P_{pec}$  – kapacita pece [kg/hod],  $P_{pec} = 1\,750 \text{ kg/hod}$

- náklady na žíhání:

$$N_{žíhání} = N_{PP} \cdot t_{pec} = 2\,600 \cdot 37,3 = 96\,980 \text{ Kč} \quad (4.14)$$

kde:  $N_{PP}$  – náklady na provoz pece [Kč/hod],  $N_{PP} = 2\,600 \text{ Kč/hod}$

E) Náklady na mzdy:

Náklady na mzdy se počítají pouze z čistého výrobního času bez doby přípravy polotovaru, manipulace či prostojů.

Prvně se stanoví náklady na mzdy pro první operaci:

- Výrobní čas jednoho kusu:

$$t_{V1.op} = \frac{60}{n_{zdvih}} = \frac{60}{2,6} = 23,1 \text{ s} = 6,42 \cdot 10^{-3} \text{ Nh} \quad (4.15)$$

kde:  $n_{zdvih}$  – zdvih stroje [ $\text{min}^{-1}$ ],  $n_{zdvih} = 2,6 \text{ min}^{-1}$

- Přímé náklady na mzdy:

$$PN_{M1.op} = t_{V1.op} \cdot n_r \cdot M_t = 6,42 \cdot 10^{-3} \cdot 8\,000 \cdot 230 = 11\,813 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

kde:  $PN_M$  – přímé náklady na mzdy [Kč]

$M_t$  – hodinová mzda operátora lisu [Kč/h],  $M_t = 230 \text{ Kč/h}$

Vzhledem k tomu, že druhá operace bude probíhat na stejném stroji, celkové náklady na mzdy budou dvojnásobkem těch na první operaci:

$$PN_M = 2 \cdot PN_{M1.op} = 2 \cdot 11\,812,8 = 23\,626 \text{ Kč} \quad (4.17)$$

F) Stanovení nákladů na energii:

Hodnota využití stroje se volí z hrubého výpočtu poměru skutečného počtu kusů za směnu a teoretického počtu kusů za směnu. Vychází se z předpokladu, že stroj pracuje celou dobu směny kromě půl hodinové přestávky na oběd a doby na přípravu. Proto je volena  $\eta = 0,85$ . Příkon stroje 500 kW, avšak stroj na takové hodnotě pracuje zhruba 25 % z celkového času. Náklady na elektřinu jsou ve firmě nyní 2,5 Kč/kWh. Náklady na obě operace jsou opět stejné:

- $PN_E = 2 \cdot (P \cdot \eta \cdot t_{V1.op} \cdot C_e \cdot n_r)$  (4.18)  
 $= 2 \cdot (500 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \cdot 6,42 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 8\,000) = 27\,285 \text{ Kč}$   
 kde:  $C_e$  – cena energie [Kč/kWh]  
 $P$  – příkon stroje [kW]  
 $\eta$  – účinnost stroje [-]

Součtem těchto hodnot se získají celkové přímé náklady:

$$PN_{CELK} = PN_{mat} + PN_M + PN_E + N_{PU} + N_{žihání} - C_{odpad} \quad (4.19)$$

$$PN_{CELK} = 666\,400 + 23\,626 + 27\,285 + 151\,840 + 96\,980 - 9\,897$$

$$PN_{CELK} = 956\,233 \text{ Kč}$$

Dále je nutné provést výpočet fixních nákladů. Podklady pro výpočet těchto hodnot jsou těžko zjistitelné a mohou se lišit v mnoha ohledech. Proto bude proveden jenom přibližný výpočet pro nastínění reálných cen. Jelikož firma daným strojem již disponuje a rozhodlo se, že se amortizace nebude brát v potaz, je tato položka nulová. Jediným fixním nákladem je potom cena za nástrojové sestavy.

Nástrojová sestava se skládá z mnoha částí, která jsou z různých materiálů. Každá z nich podléhá jiným tlakům a opotřebení a je tak těžké určit jejich životnost. Proto se bude vycházet z firemních zkušenostech a průměrných hodnot: Vzhledem k velikosti nástrojové sestavy, působícím tlakům a sil a velikosti série byly určeny následující hodnoty:

$$FN = \frac{N_{NS} \cdot n_{op} \cdot n_r}{n_{život}} = \frac{199\,900 \cdot 2 \cdot 8\,000}{6\,000} = 533\,067 \text{ Kč} \quad (4.20)$$

kde:  $N_{NS}$  – cena jedné nástrojové sestavy [Kč],  $N_{NS} = 199\,900 \text{ Kč}$

$n_{op}$  – počet operací [-]

$n_{život}$  – životnost nástrojové sestavy [ks],  $n_{život} = 6\,000 \text{ ks}$

Nyní se dají vypočítat finální hodnoty rozhodující o ekonomičnosti výroby:

- celkové náklady na celou výrobní sérii rovny:

$$N_C = PN_{CELK} + FN = 956\,233 + 533\,067 = 1\,489\,300 \text{ Kč} \quad (4.21)$$

- celkové náklady na výrobu jedno pouzdro filtru:

$$N_{Pouzdro} = \frac{N_C}{n_r} = \frac{1\,489\,300}{8\,000} = 187 \text{ Kč} \quad (4.22)$$

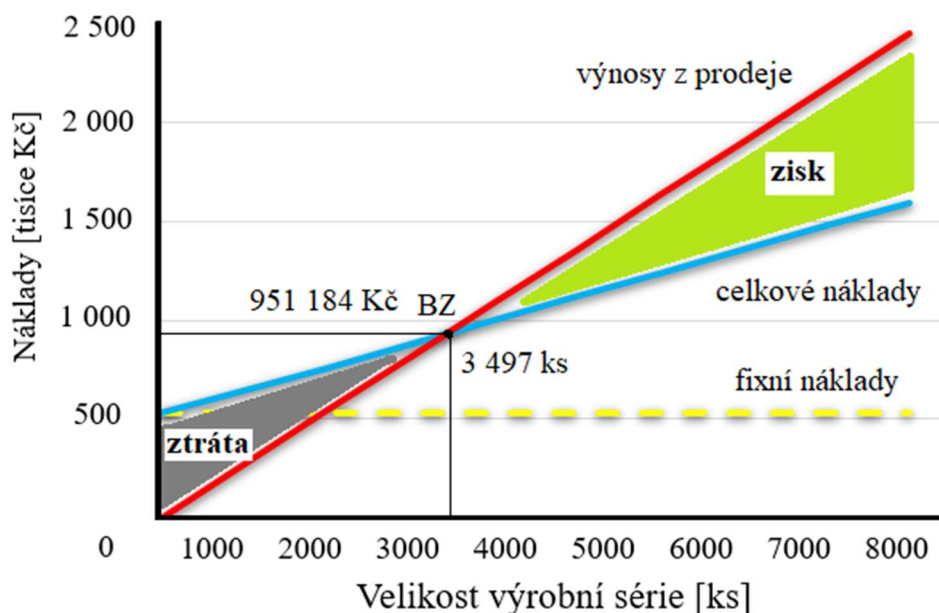
- prodejní cena pouzdra při marži 45%:

$$C_{Pouzdro} = N_{Pouzdro} \cdot 1,45 = 272 \text{ Kč} \quad (4.23)$$

- stanovení bodu zvratu:

$$BZ = \frac{FN}{C_{Pouzdro} - \frac{PN_{CELK}}{n_r}} = \frac{533\,067}{272 - \frac{956\,233}{8\,000}} = 3\,497 \text{ ks} \quad (4.24)$$

Nakonec byl vytvořen graf závislosti nákladů na velikosti výrobní série, kde lze vidět zaznačený bod zvratu. Je určen průsečíkem křivky celkových nákladů a přímkou výnosů z prodeje. Lze tedy prohlásit, že výroba se stává ziskovou při velikosti výrobní série nad 3 497 kusů. Graf je zobrazen na obrázku 70.



Obr. 70 Graf bodu zvratu [33]

Pro porovnání zvolené metody s třískovým obráběním bude ještě proveden výpočet přímých nákladů na materiál pro tuto technologii. Jako polotovár zde byla zvolena tyč o průměru 119 mm a délce 6 000 mm, která se bude řezat na špalíky o délce 312 mm pilou s tloušťkou kotouče 2 mm a nutnou délkou pro upnutí 80 mm. Výpočet je následující:

- hmotnost jedné tyče:

$$m_t = \rho \cdot V_t = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot 10^9} \cdot L_t = 7\,850 \cdot \frac{\pi \cdot 119^2}{4 \cdot 10^9} \cdot 6\,000 = 523,85 \text{ kg} \quad (4.25)$$

- cena jedné tyče - tyčový polotovar Ø119x6000 stojí zhruba 610€ za tunu, což dělá  $C_t = 7\,900 \text{ Kč}$ .



- počet přířezů z jedné tyče:  

$$n_p = \frac{L_t - L_{NK}}{H_0 + \delta_k} = \frac{6\,000 - 80}{312 + 2} = 18,85 \text{ ks} \quad (4.26)$$

Z tyče se dá získat 18 kusů přířezů.

- cena materiálu na jeden kus výrobku:  

$$C_{ks} = \frac{C_t}{n_p} = \frac{7\,900}{18} = 439 \text{ Kč} \quad (4.27)$$

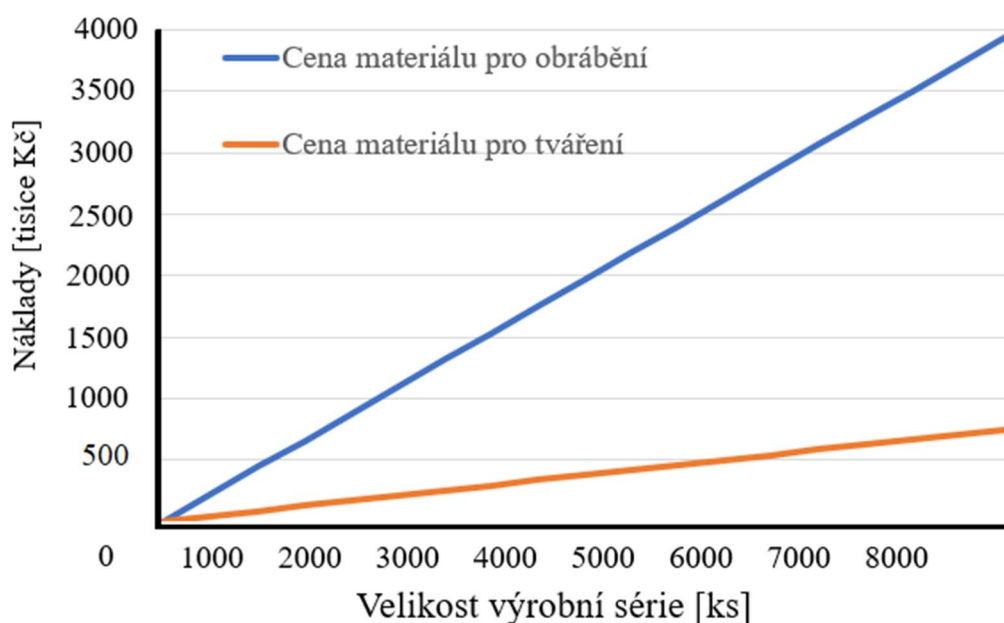
Přímé náklady na materiál pro celou roční sérii jsou potom:

$$PN_{mat} = C_{ks} \cdot n_r = 439 \cdot 8\,000 = 3\,504\,000 \text{ Kč} \quad (4.28)$$

Tento výpočet ukazuje velkou ne hospodárnost metody třískového obrábění, kde náklady na materiál jsou až 5krát větší (tabulka 20) než u tváření za studena. Rozdíl této ceny je zobrazen v grafu na obrázku 71. I když pořizovací ceny strojů a nástrojů nejsou tak velké, tato metoda se obzvlášť při velkých sériích nemůže vyplatit. Také by muselo proběhnout zušlechťení materiálu a další úpravy, které by cenu výroby ještě navýšily.

Tabulka 19 Porovnání nákladů

Porovnání nákladů za materiál pro výrobní sérii 8 000 kusů za rok	
Tváření za studena	Třískové obrábění
<b>666 400 Kč</b>	<b>3 504 000 Kč</b>



Obr. 71 Porovnání nákladů na materiál

## 5 ZÁVĚRY

Práce je zaměřena na návrh výroby pouzdra tlakového filtru, na kterém bylo spolupracováno s firmou Metaldyne Oslavany, která danou součást zrovna uváděla do výroby. Všechny rozměry, geometrie a požadavky na kryt byly zadány od zákazníka, který kladl důraz na jednoduchost výroby a kvalitní mechanické vlastnosti dílu. Z tohoto hlediska a z podstaty součásti byla zvolena technologie sdruženého protlačování, která společně se zvoleným materiálem – ocelí C 15, vyhoví nárokům zadavatele.

Byl zvolen polotovár o větším průměru, než má výsledné pouzdro. Kalota má průměr 128 mm a výšku 81 mm a bude řezána na kotoučové pile z tyčového polotovaru

Z hlediska technologického postupu byly zvažovány dvě varianty. Zvolená varianta má dvě operace, kdy před každou z nich musí proběhnout povrchová úprava fosfátováním a mýdlováním. Kvůli vysokým hodnotám přetvoření bylo navrženo mezioperační rekrytalizační žíhání, které obnoví plastické vlastnosti materiálu. Proveditelnost výroby krytu byla ověřena výpočty. Vzhledem k hraničním hodnotám přetvoření v oblasti šestihranu se doporučuje pravidelná kontrola při výrobě.

Pomocí výpočtů a simulačního programu Deform 2D byly navrženy nástrojové soustavy pro obě operace. Snahou bylo zajistit plynulý tok materiálu, aby výsledný protlaček byl bez přetoků a vad.

Vzhledem k velikosti přetvárných sil, které se obě pohybovaly okolo 18 000 kN byl zvolen pro obě operace stroj EITEL KG KARLSRUHE, který dokáže vyvolat jmenovitou sílu až 25 000 kN.

Náklady na celkovou výrobu vyšly 1 489 300 Kč, přičemž náklady na jeden kus jsou 187 Kč. Při zvolené marži 45 % byla prodejní cena za kus 272 Kč. Hranice bodu zvratu je 3 497 kusů. Velikost výrobní série se ukázala jako rozhodující hledisko při volbě technologie.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [41]

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
3. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
4. American Axle & Manufacturing. *AAM* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.aam.com/what-we-do/our-products/metal-forming>
5. BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. *Objemové tváření ocelí*. Praha: SNTL, 1967, 332 s. Řada strojírenské literatury. ISBN 04-239-67.
6. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80- 214 0404-3.
7. Hydraulický systém. *PK SERVIS: technické součásti s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.pkservis.com/cz/prumyslove-a-mobilni-hydraulicke-systemy-rexroth-bosch>
8. Vysokotlaký filtr. *Womack* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.womackmachine.com/products/hydraulics/filters-and-breathers/high-pressure-filters/stauff-high-pressure-filters/>
9. KAREL, NĚMEC. Tepelné zpracování ocelí. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura\\_a\\_vlastnosti\\_materialu/pre-dnasky/04%20-%20Druhy%20a%20zpusoby%20TZ.pdf](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/pre-dnasky/04%20-%20Druhy%20a%20zpusoby%20TZ.pdf)
10. Odlévání. *ESTERER GIESSEREI* [online]. 2013 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.esterer-giesserei.de/cz/nase-spolecnost/cile-spolecnosti/>
11. Obrábění. *PB-com: CNC obrábění* [online]. 2017 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.pb-com.cz/aktualita/22-instalace-noveho-cnc-stroje.html>
12. Zápustkové kování. *PROXIA: The MES company* [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.proxia.com/pl/referencje-i-zalety/studium-przypadku-uzytkownikow/zbieranie-danych-mes-bde-mde-pze-caq/601-sprawozdanie-uzytkownika-krenhof-ag>
13. Protlačování. *JLO METAL PRODUCTS: Impact Extrusions* [online]. 2015 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.jlometal.com/impact-extruded-aluminum-products.html>
14. ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání – teoretický základ: objemové tváření zastudena*. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3015-5

15. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
16. Kotoučová pila. *K&K Servis* [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.kkservis.cz/kotoucova-pila-exactcut-155>
17. Kotoučová pila. *K&K Servis* [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.kkservis.cz/kotoucova-pila-exactcut-155>
18. Fosátování. *Tribotechnika* [online]. TechPark [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/klasifikace-fosfatovych-povlaku.html>
19. FELDMANN, Heinz D. *Protlačování ocel*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
20. Výroba a druhy maziv. *Tribotechnika* [online]. TechPark [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/vyroba-a-druhy-maziv.html>
21. Součásti - protlačování za studena. *Tecmetal* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [http://www.tecmetal.com/coldforming/cold\\_forming.htm](http://www.tecmetal.com/coldforming/cold_forming.htm)
22. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 349 s. ISBN 80-010-1003-1.
23. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
24. Nástrojové oceli. *Tumlikovo: Metal cutting technologies* [online]. 2010 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rozdeleni-nastrojovych-oceli/>
25. FERMUNT, Přemsl, Jiří KREJČÍ a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
26. MORAVEC, Ján a Jozef BÍLIK. *Tváriace stroje a nástroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2017. Vysokoškolské učebnice. ISBN 978-80-554-1339-6.
27. PÍČ, Josef. *Výrobní stroje: výrobní program n.p. Šmeralovy závody: výtah z publikace Tvářecí stroje, vydaného SNTL v roce 1974*. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Učební texty vysokých škol.
28. VAVŘÍK, Ivan, Petr BLECHA a Josef HAMPL. *VÝROBNÍ STROJE A ZAŘÍZENÍ: Syllabus přednášek pro kombinované bakalářské studium*. Brno, 2002, 104 s.
29. Hydraulický lis. *RHTC* [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://rhtc-workshoppress.com/products/production-presses/pprm-150/>
30. Klikový lis. *YAdon: Powered by Schuler* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.yadonpress.com/mp-15837382412836767.html>
31. Tvářecí automat. *Deník.cz* [online]. 2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://pr.denik.cz/doporucujeme/lisi-odbornici-na-postupove-tvareni-kovu-z-cejce-20201029.html>

32. *Oborový projekt 2* [online]. Brno: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p\\_oborovy\\_projekt\\_2\\_forejt.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p_oborovy_projekt_2_forejt.pdf)
33. PETRTYL, Jan. Bod Zvratu. *Marketing Mind* [online]. 2018 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.marketingmind.cz/bod-zvratu-priklad-vzorec-vypocet-graf/>
34. Journal of Machining and Forming Technologies: *Upper-bound analysis of combined extrusion-forging process: pentagonal head with round shaft product from cylindrical billet* [online]. National Institute of Technology, Rourkela, Orissa, India, 2013 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/upper-bound-analysis-combined-extrusion-forging/docview/1627087466/se-2?accountid=17115>
35. RANDELOVIĆ, Saša, Miloš MADIĆ, Mladomir MILUTINOVIĆ a Dejan TANIKIĆ. Methodological approach for the texture deformation analysis in the cold extrusion process. *Scholarly Journa* [online]. 2017, 29.4. 2017, (92), 3593-3603 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0373-3
36. GERASIMOVA, Alla A., Sergey GORBATYUK a Dmitry EFREMOV. Modeling of Tool for Cold Extrusion of Steel and Tooling with Proportional Bandaging. *Solid State Phenomena* [online]. 2020, leden 2020, **299**, 513-517 [cit. 2021-5-21]. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.299.513
37. KU, Tae-Wan. A Combined Cold Extrusion for a Drive Shaft: A Parametric Study on Tool Geometry. *Materials* [online]. Pusan National University, Korea, 2020, 13.5.2020, **13**(10) [cit. 2021-5-21]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13102244
38. AMIGO, Francisco a Ana CAMACHO. Reduction of Induced Central Damage in Cold Extrusion of Dual-Phase Steel DP800 Using Double-Pass Dies. *Metals* [online]. Department of Manufacturing Engineering, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 28040 Madrid, 2017, 31.9.2017, **7**(9), 0-18 [cit. 2021-5-21]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met7090335
39. RAJABZADEH GATABI, Moein, Hamed AFRASIAB a Ali MOAZEMI GOUDARZI. Numerical and experimental study of the process parameters effect on the void evolution in the cold extrusion of rods. *Scientia Iranica* [online]. Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, 2018, 31.12.2018, **1**(32), 287-294 [cit. 2021-5-21]. ISSN 2345-3605. Dostupné z: doi:10.24200/sci.2018.50154.1540
40. LI, Wei, Decheng WANG, Peng CHENG a L. FORTUNA. Design and Research of Automatic Tool Changer System for Multistation Spring Forming Machine. *Journal of Robotics* [online]. Beijing, China, 2020, 1.12.2020, **2020**, 1-9 [cit. 2021-5-21]. ISSN 1687-9619. Dostupné z: doi:10.1155/2020/4635056
41. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAMPOUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Latinská abeceda

Označení	Legenda	Jednotka
a	koeficient poloměrů	[-]
A	přetvárná práce	[J]
A <sub>j</sub>	Měrná přetvárná práce	[J·mm <sup>-3</sup> ]
BZ	Bod zvratu	[ks]
C <sub>e</sub>	cena energie	[Kč/kWh]
C <sub>ks</sub>	Cena materiálu za jeden kus výrobku	[Kč]
C <sub>Pouzdro</sub>	prodejní cena pouzdra	[Kč]
C <sub>t</sub>	Cena jedné tyče	[Kč]
d	Vnitřní průměr	[mm]
D <sub>(O1)1</sub>	Vnější poloměr objímky 1 – 2. operace	[mm]
D <sub>(O1)2</sub>	Vnější poloměr objímky 1 – 2. operace	[mm]
D <sub>(O2)2</sub>	Vnější poloměr objímky 2 – 2. operace	[mm]
D <sub>(P2)1</sub>	Vnější poloměr průtláčnice 1 – 2. operace	[mm]
D <sub>(P2)2</sub>	Vnější poloměr průtláčnice 2 – 2. operace	[mm]
D <sub>0</sub>	Výchozí průměr	[mm]
D <sub>0</sub>	Průměr polotovaru	[mm]
D <sub>1</sub>	Konečný průměr	[mm]
D <sub>O1</sub>	Vnější poloměr objímky 1 – 1. operace	[mm]
D <sub>O2</sub>	Vnější poloměr objímky 2 – 1. operace	[mm]
D <sub>P1</sub>	Vnější poloměr průtláčnice – 1. operace	[mm]
f <sub>1</sub>	Součinitel tření ve válcovém kontejneru	[-]
f <sub>2</sub>	Součinitel tření očka	[-]
f <sub>2stř</sub>	Střední součinitel tření	[-]
f <sub>3</sub>	Součinitel tření očka	[-]
FN	Fixní náklady	[Kč]
F <sub>P</sub>	Protlačovací síla	[N]
F <sub>p1_I</sub>	Protlačovací síla pro oblast I – 1. op	[N]
F <sub>p1_II</sub>	Protlačovací síla pro oblast II – 1. op	[N]
F <sub>p2_I</sub>	Protlačovací síla pro oblast I – 2. op	[N]
F <sub>p2_II</sub>	Protlačovací síla pro oblast II – 2. op	[N]
H <sub>0</sub>	Výška polotovaru	[mm]
h <sub>d</sub>	Výška dna po první operaci	[mm]
h <sub>V1</sub>	Výška válcové části po první operaci	[mm]
k	Nosnost jednoho koše	[kg]
L <sub>NK</sub>	Nevyužitý konec tyče	[mm]
L <sub>t</sub>	Délka tyče	[mm]
m <sub>p2</sub>	Celková hmotnost polotovarů po druhé operaci	[kg]
m <sub>t</sub>	Hmotnost jedné tyče	[kg]
M <sub>t</sub>	hodinová mzda operátora lisu	[Kč/h]
m <sub>ts</sub>	Hmotnost celkového počtu tyčového polotovaru pro výrobní sérii	[kg]



Označení	Legenda	Jednotka
$N_C$	celkové náklady na celou výrobní sérii rovny	[Kč]
$n_{koš}$	Počet košů na povrchovou úpravu	[ks]
$N_{koš}$	Náklady na povrchovou úpravu	[Kč]
$N_{NS}$	cena jedné nástrojové sestavy	[Kč]
$n_{op}$	počet operací	[-]
$n_p$	Počet přířezů z jedné tyče	[ks]
$N_{Pouzdro}$	celkové náklady na výrobu jedno pouzdro filtru	[Kč]
$N_{PP}$	Náklady na provoz pece	[Kč/h]
$N_{PU}$	Náklady na povrchovou úpravu celé série	[Kč]
$n_r$	Velikost výrobní série	[ks]
$n_t$	Počet tyčí pro výrobu zadané série	[ks]
$N_{žihání}$	Náklady na žihání	[Kč]
$n_{život}$	životnost nástrojové sestavy	[ks]
$p_1$	tlak na průtlačnici	[MPa]
$PN_{CELK}$	celkové přímé náklady	[Kč]
$PN_E$	Náklady na energie	[Kč]
$PN_M$	přímé náklady na mzdy	[Kč]
$P_{pec}$	Kapacita pece	[kg/h]
$r_0$	vnitřní poloměr průtačnice	[mm]
$r_1$	vnější poloměr průtlačnice	[mm]
$S_0$	Výchozí průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$S_1$	Konečný průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$t_{pec}$	Počet hodin v průběžné peci	[h]
$t_{V1.op}$	Výrobní čas jednoho kusu	[Nh]
$V_D$	Objem dna součásti	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{D\_1.op}$	Objem dna součásti po 1. operaci	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{polotovaru}$	Objem polotovaru	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{protlaček}$	Objem součásti	[mm <sup>3</sup> ]
$V_S$	Objem součásti	[mm <sup>3</sup> ]
$V_t$	Objem tyče	[m <sup>3</sup> ]
$V_V$	Objem válcové části součásti	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{V\_1.op}$	Objem válcové části součásti po 1. operaci	[mm <sup>3</sup> ]

#### Řecká abeceda

Označení	Legenda	Jednotka
$\beta$	Úhel čela průtlačníku	[°]
$\gamma$	Úhel zkosení průtlačnice	[°]
$\Delta D_{(O1O2)2}$	Přesazení mezi objímkou 1 a objímkou 2 – 2 op.	[mm]
$\Delta D_{(PO1)}$	Přesazení mezi průtlačnicí 1 a objímkou 1	[mm]
$\Delta D_{(PO1)2}$	Přesazení mezi průtlačnicí 2 a objímkou 1	[mm]
$\Delta D_{O1O2}$	Přesazení mezi objímkou 1 a objímkou 2	[mm]
$\Delta D_{PO1}$	Přesazení mezi průtlačnicí a objímkou 1	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
$\eta$	Účinnost stroje	[-]
$\rho$	Hustota oceli	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_{\text{Dipper}}$	Deformační odpor dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{\text{dSachs}}$	Deformační odpor dle Sachse	[MPa]
$\sigma_{\text{dSiebel}}$	Deformační odpor dle Siebla	[MPa]
$\sigma_{\text{Feld}}$	Deformační odpor dle Feldmanna	[MPa]
$\sigma_{\text{FeldD}}$	Deformační odpor dle Feldmanna pro duré tělasa	[MPa]
$\sigma_{\text{p}}$	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{\text{p\_I}}$	Přirozený přetvárný odpor po 1. op – oblast I	[MPa]
$\sigma_{\text{p\_II}}$	Přirozený přetvárný odpor po 1. op – oblast II	[MPa]
$\sigma_{\text{p\_2I}}$	Přirozený přetvárný odpor po 2. op – oblast I	[MPa]
$\sigma_{\text{p\_2II}}$	Přirozený přetvárný odpor po 2. op – oblast II	[MPa]
$\sigma_{\text{PS}}$	střední přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{\text{r1(D)}}$	Radiální napětí pro oblast 1	[MPa]
$\sigma_{\text{r1(G)}}$	Radiální napětí ve válcovém kontejneru	[MPa]
$\sigma_{\text{r2(D)}}$	Radiální napětí pro oblast 2	[MPa]
$\sigma_{\text{r3(G)}}$	Radiální napětí v kalibračním očku	[MPa]
$\sigma_{\text{rstr1(D)}}$	Střední radiální napětí pro oblast 1	[MPa]
$\sigma_{\text{rstr2(D)}}$	Střední radiální napětí pro oblast 2	[MPa]
$\sigma_{\text{SiebelDP}}$	Deformační odpor dle Siebla pro DP	[MPa]
$\sigma_{\text{z1(D)}}$	Osové napětí pro oblast 1	[MPa]
$\sigma_{\text{z1(G)}}$	Osové napětí ve válcovém kontejneru	[MPa]
$\sigma_{\text{z2(D)}}$	Osové napětí pro oblast 2	[MPa]
$\sigma_{\text{Z3(G)}}$	Osové napětí v kalibračním očku	[MPa]
$\sigma_{\text{p2(G)}}$	Osové napětí v kuželové průtlačnici	[MPa]
$\sigma_{\varphi 2(\text{G})}$	Napětí na stěně kuželu	[MPa]
$\tau_{\text{f1(G)}}$	Smykové napětí ve válcovém kontejneru	[MPa]
$\tau_{\text{f2(D)}}$	Smykové napětí pro oblast 2	[MPa]
$\tau_{\text{f2(G)}}$	Smykové napětí v kuželové průtlačnici	[MPa]
$\tau_{\text{f3(G)}}$	Smykové napětí v kalibračním očku	[MPa]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\varphi_1$	Logaritmická deformace	[-]
$\varphi_{1\_I}$	Přetvoření po první operaci – oblast I	[-]
$\varphi_{1\_II}$	Přetvoření po první operaci – oblast II	[-]
$\varphi_2$	Logaritmická deformace	[-]
$\varphi_{2\_I}$	Přetvoření po druhé operaci – oblast I	[-]
$\varphi_{2\_II}$	Přetvoření po druhé operaci – oblast II	[-]
$\varphi_{2\_III}$	Přetvoření po druhé operaci – oblast III	[-]
$\varphi_{2\_IV}$	Přetvoření po druhé operaci – oblast IV	[-]
$\varphi_3$	Logaritmická deformace	[-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vzory součástí vyráběné objemovým tvářením [5] .....	9
Obr. 2 Řešená součást [vl. tvorba] .....	10
Obr. 3 Logo firmy [4] .....	10
Obr. 4 Umístění pouzdra tlakového filtru [7], [8] .....	10
Obr. 5 Vyráběná součást [vl. tvorba] .....	11
Obr. 6 Struktura materiálu [9] .....	11
Obr. 7 Odlévání [10] .....	12
Obr. 8 Obrábění [11] .....	12
Obr. 9 Zápusťkové kování [12] .....	13
Obr. 10 Protlačování [13] .....	13
Obr. 11 Změna mech. vlastností při tvářením za studena [1] .....	14
Obr. 12 Sdružené protlačování [2] .....	14
Obr. 13 Řezání polotovaru na kotoučové pile [16] .....	15
Obr. 14 Metody žíhání rozděleny dle teplot [9] .....	15
Obr. 15 Fosfátová linka [17] .....	16
Obr. 16 Mýdlované součástky [vl. Tvorba] .....	17
Obr. 17 Mikroskopický snímek fosfátové vrstvy [18] .....	17
Obr. 18 Příklady součástí vyrobené dop. protlačováním [21] .....	18
Obr. 19 Dopředné protlačování [2] .....	18
Obr. 20 Rozměry protlačku pro duté dop. protlačování [1] .....	19
Obr. 21 Rozměry protlačku pro dop. protlačování [1] .....	19
Obr. 22 Kalibrační očko [1] .....	20
Obr. 23 Geometrický model průtlačnice [1] .....	20
Obr. 24 Válcový kontejner [1] .....	21
Obr. 25 Kuželová průtlačnice [1] .....	21
Obr. 26 Průběh zpětného protlačování [2] .....	23
Obr. 27 Rozměry protlačku [1] .....	23
Obr. 28 Zpětné protlačování [1] .....	23
Obr. 29 Geometrický model zpětného protlačování [1] .....	24
Obr. 30 Průtlačník pro dop. protlačování [1] .....	26
Obr. 31 Dělený průtlačník [1] .....	27
Obr. 32 Průtlačnice pro dop. protlačování [1] .....	27
Obr. 33 Průtlačník pro zpět. Protlačování [1] .....	28
Obr. 34 Závislost deformačního odporu na poloze průtlačníku [1] .....	29
Obr. 35 Závislost deformačního odporu na tvaru průtlačníku [1] .....	29
Obr. 36 Průtlačnice pro zpětné protlačování [1] .....	29
Obr. 37 Armovaná průtlačnice [1] .....	30
Obr. 38 Hydraulický lis [29] .....	31
Obr. 39 Klikový lis [30] .....	31
Obr. 40 Tvářecí automat [31] .....	32
Obr. 41 Technologičnost tvarů [2] .....	33
Obr. 42 Řešená součást [vl. tvorba] .....	34
Obr. 43 Varianta 1 [vl. tvorba] .....	34
Obr. 44 Varianta 2 [vl. tvorba] .....	35
Obr. 45 Rozměry kalíšku po první operaci [vl. tvorba] .....	37
Obr. 46 Rozměry polotovaru [vl. tvorba] .....	38
Obr. 47 Tyčový polotovar [vl. tvorba] .....	38
Obr. 48 Připravený polotovar na první operaci [vl. tvorba] .....	39
Obr. 49 Linka povrchových úprav [vl. tvorba] .....	39

Obr. 50 Změna polotovaru po první operaci [vl. tvorba] .....	40
Obr. 51 Výpust pece [vl. tvorba].....	42
Obr. 52 Diagram rekrystalizačního žhání [9].....	42
Obr. 53 Průtlaček po první operaci .....	42
Obr. 54 Druhá operace [vl. tvorba] .....	43
Obr. 55 Graf protlačovací síly pro druhou operaci [vl. tvorba] .....	45
Obr. 56 Graf protlačovací síly pro první operaci [vl. tvorba] .....	46
Obr. 57 Tok materiálu při první operaci [vl. tvorba] .....	46
Obr. 58 Logaritmické přetvoření z programu Deform 2D [vl. tvorba] .....	47
Obr. 59 Armovaná průtlačnice pro 1. operace [vl. tvorba] .....	48
Obr. 60 Průtlačnice pro 1. operaci [vl. tvorba].....	49
Obr. 61 Průtlačník pro 1. operaci .....	49
Obr. 62 Nástrojová sestava pro 1. operaci [vl. tvorba] .....	50
Obr. 63 Horní armovaná průtlačnice.....	51
Obr. 64 Spodní armovaná průtlačnice pro 2. op [vl. tvorba] .....	51
Obr. 65 Spodní průtlačnice pro 2. op. ....	52
Obr. 66 Horní průtlačnice pro 2. op. ....	52
Obr. 67 Průtlačník pro 2. op. ....	52
Obr. 68 Nástrojová sestava pro 2. operaci [vl. tvorba] .....	53
Obr. 69 stroj EITEL KG KARLSRUHE.....	54
Obr. 70 Graf bodu zvratu [33].....	58
Obr. 71 Porovnání nákladů na materiál.....	59

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Chemické složení oceli C15 .....	12
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti oceli C15 .....	12
Tabulka 3 Mezní intervaly přetvoření [5] .....	25
Tabulka 4 Materiály používané v nástrojích sestavy [22], [23], [24], [25],.....	26
Tabulka 5 Rozměry průtláčnice pro dop. protlačování [1] .....	28
Tabulka 6 Rozměry průtláčníku pro zpět. Protlačování [1] .....	28
Tabulka 7 Parametry průtláčnic [1].....	30
Tabulka 8 Volba vnějšího průměru pro 1. op [mm].....	36
Tabulka 9 Povrchová úprava pro ocel C15 .....	39
Tabulka 10 Porovnání hodnot přetvoření pro první operaci – oblast I [5].....	40
Tabulka 11 Porovnání hodnot přetvoření pro první operaci – oblast II .....	41
Tabulka 12 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast I [5].....	43
Tabulka 13 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast II [5] .....	44
Tabulka 14 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast III [5] .....	44
Tabulka 15 Porovnání hodnot přetvoření pro druhou operaci – oblast IV [5] .....	45
Tabulka 16 Porovnání vypočtených hodnot přetvoření se simulací .....	47
Tabulka 17 Parametry stroje .....	54
Tabulka 18 Náklady na výrobu [32] .....	55
Tabulka 19 Porovnání nákladů.....	59

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálový list

Příloha 2 Křivka zpevnění pro ocel 12 020

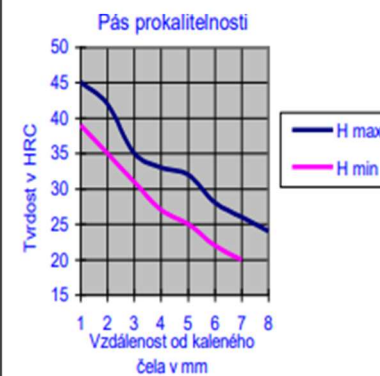
## SEZNAM VÝKRESŮ

Výkres sestavy pro 1. operaci

Výkres sestavy pro 2. operaci

DP-2021-A2-OP1

DP-2021-A2-OP2

Přehled vlastností oceli C15E ( C15 R )								1.1141 (1.1140)																																																											
Druh oceli		Nelegovaná ušlechtilá ocel k cementování																																																																	
TDP		ČSN EN 10084																																																																	
Dřívější označení		Ck 15 ( Ck 15 ) podle DIN 17210, 12 023 podle ČSN																																																																	
Charakteristika		Méně namáhané cementované strojní díly menších rozměrů se střední pevností v jádře ( méně namáhaná ozubená kola, vačkové hřídele, řetězová kola vodicí a pod. ).																																																																	
Chemické složení v % hmot. ( rozbor tavby )	C	Si max.	Mn	P max.	S <sup>1)</sup> max.	Cr	Mo	Ni	Al																																																										
	0,12 - 0,18	0,40	0,30 - 0,60	0,035	0,035	-	-	-	Při kontrolované velikosti austenitického zrna 0,015-0,050 (informativně; není uvedeno v normě).																																																										
Dovolené odchylky od složení tavby ve výrobku <sup>4)</sup>		± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	-	-	-																																																										
Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popouštění při 150-200 °C (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084) <sup>2)</sup>	Průměr v mm		Re min. MPa	Rm MPa		A min. %		Z min. %	KCU min. J.cm <sup>-2</sup>																																																										
	d ≤ 11		440	735 – 1180		9		-	25																																																										
	11 < d ≤ 25		345	540 – 785		11		-	30																																																										
	25 < d ≤ 40		295	490 – 735		14		-	35																																																										
Hodnoty tvrdosti HB pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (S)		Žhánno na měkko (A)		Zpracováno na rozmezí tvrdosti (TH)		Zpracováno na feriticko-perlitickou strukturu (FP)																																																												
	-		max. 143		-		114 – 154 <sup>5)</sup>																																																												
	Stav po válcování		Stav po normalizačním žhání		Žhánno na globulární cementit (vhodné pro tváření za studena)																																																														
	ca 170 <sup>5)</sup>		ca 160 <sup>5)</sup>		max. 132 <sup>5)</sup>																																																														
<div> <div>  <p>Pás prokalitelnosti</p> <p>— H max</p> <p>— H min</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8</p> <p>Vzdálenost od kaleného čela v mm</p> </div> <div> <p>Teplota kalení pro čelní zkoušku prokalitelnosti : 800 °C</p> <p>Hodnoty prokalitelnosti pro tuto značku nejsou součástí normy EN 10084.</p> <table> <tr> <th colspan="9">Prokalitelnost – H <sup>3)</sup></th></tr> <tr> <th colspan="9">Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm</th></tr> <tr> <th></th><th colspan="8">Tvrdost v HRC</th></tr> <tr> <td>Meze</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr> <td>Max.</td><td>45</td><td>42</td><td>35</td><td>33</td><td>32</td><td>28</td><td>26</td><td>24</td></tr> <tr> <td>Min.</td><td>39</td><td>35</td><td>31</td><td>27</td><td>25</td><td>22</td><td>20</td><td>-</td></tr> </table> </div> </div>										Prokalitelnost – H <sup>3)</sup>									Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm										Tvrdost v HRC								Meze	1	2	3	4	5	6	7	8	Max.	45	42	35	33	32	28	26	24	Min.	39	35	31	27	25	22	20	-				
Prokalitelnost – H <sup>3)</sup>																																																																			
Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm																																																																			
	Tvrdost v HRC																																																																		
Meze	1	2	3	4	5	6	7	8																																																											
Max.	45	42	35	33	32	28	26	24																																																											
Min.	39	35	31	27	25	22	20	-																																																											
Technologické vlastnosti																																																																			
Tváření za tepla		Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																																																																	
Teplné zpracování	Normalizační žhání °C	Žhání na měkko °C	Isotermické žhání	Teplota cementace °C		Teplota kalení na jádro °C <sup>b)</sup>	Teplota kalení na povrch °C <sup>b)</sup>	Teplota popouštění °C <sup>c)</sup>																																																											
	920	650 až 700	900 až 950 650 1 hod.	880 až 980		880 až 920 voda (olej)	780 až 820 voda (olej)	150 až 200																																																											
<p>Uvedené podmínky jsou doporučené.</p> <p><sup>a)</sup> při jednoduchém kalení se ocel kalí z teploty cementace nebo nižší (závisí na tvaru výrobku).</p> <p><sup>b)</sup> druh ochlazovacího prostředku závisí na př. na tvaru výrobku a na podmínkách ochlazování.</p> <p><sup>c)</sup> doba popouštění minimálně 1 hod.</p>																																																																			
Obrobitelnost		Pro dobrou obrobitelnost je výhodný stav FP. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel C15R se zvýšeným obsahem S.																																																																	
Stříhatelnost		Ocel C15 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování.																																																																	
<p><sup>1)</sup> Obsah síry u oceli C15R je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %.</p> <p><sup>2)</sup> Prokazují se na referenčním vzorku uvedených průměrů. Slouží k průkazu dosažitelnosti mechanických hodnot v jádře po kalení a popouštění. Uvedené hodnoty jsou převzaty z literatury.</p> <p>Re – mez kluzu, Rm – pevnost v tahu, A – tažnost ( počáteční měřená délka L<sub>0</sub> = 5,65√S<sub>0</sub> ), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso KCU s U-vrubem ( průměr ze tří zjištěných hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty ).</p> <p><sup>3)</sup> Hodnoty prokalitelnosti jsou pouze informativní.</p> <p><sup>4)</sup> ± znamená, že u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí rozboru tavby, ale nikoli obě současně.</p> <p><sup>5)</sup> Uvedené údaje jsou informativní a nejsou součástí EN 10084</p>																																																																			



